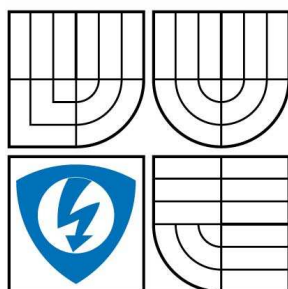


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**  
**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND  
COMMUNICATION**  
**DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

# **IDENTIFIKACE ZDROJŮ HLUKU POMOCÍ AKUSTICKÉ HOLOGRAFIE V BLÍZKÉM POLI**

**NOISE SOURCE IDENTIFICATION USING NEARFIELD ACOUSTICAL HOLOGRAPHY**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

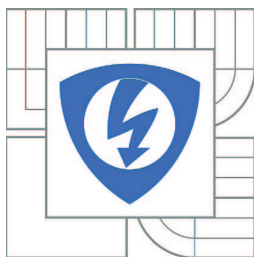
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. TOMÁŠ NEVOLE**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. JIŘÍ SCHIMMEL, Ph.D.**

**BRNO 2011**



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Telekomunikační a informační technika**

**Student:** Bc. Tomáš Nevole

**ID:** 97916

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Identifikace zdrojů hluku pomocí akustické holografie v blízkém poli**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte metody měření akustického tlaku a akustické intenzity pro identifikaci zdrojů hluku a problematiku akustické holografie v blízkém poli (Nearfield Acoustical Holography). V prostředí Matlab vytvořte funkci, která z výstupních signálů pole mikrofónů snímajících akustický tlak vypočítá pomocí akustické holografie v blízkém poli mapu intenzity akustického vlnění vyzařovaného měřeným objektem.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Williams, E., G., Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography. Academic Press, 2003. ISBN: 978-0127539607
- [2] Smetana, C. a kol., Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha 1998. ISBN: 80-901936-2-5
- [3] Zaplatílek, K., Doňar, K., Matlab, tvorba uživatelských aplikací. BEN - Technická literatura, Praha 2004. ISBN: 80-7300-133-0

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 26.5.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá rozbořem problematiky identifikace zdrojů hluku pomocí akustické holografie v blízkém poli. Tato metoda je obvykle označována zkratkou NAH z angl. „Nearfield acoustical holography“.

V práci jsou shrnuty základní pojmy a veličiny zvukového pole, které jsou pro pochopení problematiky nezbytné. Ve stati je proveden podrobnější popis technologie NAH, historické souvislosti jejího vzniku a samostatná kapitola je věnována měřicím prostředkům používaným pro snímání akustických polí. Dále jsou charakterizovány druhy NAH podle tvaru vlnoplochy analyzovaného vlnění, nejvíce prostoru je věnováno planární holografii. Protože aplikace algoritmů NAH se odehrává v oblasti vlnových čísel ( $k$ -space), je tomuto tématu vymezen rovněž určitý prostor. Stručně se práce zabývá také metodami příbuznými NAH: statisticky optimalizované NAH (SONAH) a iterativní NAH s rekurzivní filtrací.

Hlavním výstupem práce je praktická část v podobě ověřovací aplikace. Ta je vytvořena v prostředí Matlab a je schopna vykreslit hologram snímaného pole metodou planární NAH s použitím „ $k$ -space“ filtru. Aplikace předpokládá směr šíření vlnění podél osy  $z$ , tedy ve směru normály zdrojové roviny. Aplikace předpokládá rovinný zdroj, v ostatních případech nelze přesnost rekonstrukce zaručit. Jsou také uvedeny některé hologramy vypočtené pomocí této aplikace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

NAH, SONAH, identifikace zdrojů hluku,  $k$ -prostor,  $k$ -space filtr, mikrofonní pole.

# ABSTRACT

This master's thesis deals with problems of noise source identification using nearfield acoustical holography (NAH).

In the beginning there is the summary of basic terms and values of a sound pressure field, which is unnecessary for understanding of the theme. In the next part the thesis continues with more detailed description of the NAH technology and the historical context of its emergence. Measurement equipment which is used for scanning of sound pressure fields is also introduced. In addition, the kinds of NAH (according the shape of the wave front) are showed and the planar NAH is described most closely. Because of the NAH algorithms are implemented in the wave number domain ( $k$ -space), there is also a chapter focused to this problem in the thesis. There are briefly described some similar methods in next chapter, like statistically optimized NAH, (SONAH) and iterative NAH with recursive filtration.

The main product of the thesis is the practical part represented by testing application. That is created in the Matlab environment and is able to calculate and display hologram of the scanned array by the planar NAH method using the " $k$ -space" filter. The application supposes a planar sound source and in other cases the accuracy of the reconstruction is not guaranteed. There are also given some holograms calculated with the application.

# KEYWORDS

NAH, SONAH, noise sources identification,  $k$ -space filter, microphone array.

NEVOLE, T. *Identifikace zdrojů hluku pomocí akustické holografie v blízkém poli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Identifikace zdrojů hluku pomocí akustické holografie v blízkém poli“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne .....

podpis autora .....

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Schimmelovi, Ph.D. za poskytnutí metodické pomoci a směřodatných připomínek při realizaci mé diplomové práce.

V Brně dne .....

.....

podpis autora

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>AKUSTICKÉ POLE A AKUSTICKÁ HOLOGRAFIE .....</b>	<b>12</b>
2.1	Akustické pole, základní pojmy a veličiny .....	12
2.2	Akustická holografie a akustická holografie v blízkém poli .....	13
2.3	Účel akustické holografie .....	16
<b>3</b>	<b>MĚŘÍCÍ PROSTŘEDKY V AKUSTICKÉ HOLOGRAFII .....</b>	<b>18</b>
3.1	Mikrofony .....	18
3.2	Intenzitní sondy .....	19
<b>4</b>	<b>DRUHY AKUSTICKÉ HOLOGRAFIE V BLÍZKÉM POLI.....</b>	<b>21</b>
4.1	Planární holografie .....	21
4.1.1	Jednorozměrný zdroj zvuku .....	23
4.1.2	<i>K</i> -prostor a <i>k</i> -space filtr .....	24
4.1.3	Spektrální prosakování.....	27
4.1.4	Měřící vzdálenost a mezní kmitočet <i>k</i> -filtru.....	30
4.1.5	Rekonstrukce .....	31
4.2	Cylindrická holografie.....	33
4.3	Sférická holografie .....	35
<b>5</b>	<b>JINÉ ZPŮSOBY VÝPOČTŮ UŽÍVANÉ V NAH.....</b>	<b>38</b>
5.1	SONAH.....	38
5.2	ITERATIVNÍ NAH S REKURZIVNÍ FILTRACÍ .....	39
<b>6</b>	<b>PRAKTICKÁ REALIZACE .....</b>	<b>40</b>
6.1	Měřicí podmínky .....	40
6.2	Tvorba programu v prostředí Matlab .....	42
6.2.1	Základ aplikace a textové rozhraní .....	42
6.2.2	Tvorba grafického uživatelského rozhraní .....	43
6.2.3	Použití programu.....	45
6.2.4	Naměřené a vypočtené hodnoty .....	49
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>55</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>58</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1: Mikrofon Brüel & Kjær, typ 4961.

Obr. 3.2: Mikrofon 4193 fy. Brüel & Kjær.

Obr. 3.3: Sonda p – p, Brüel & Kjær, typ 3595.

Obr. 3.4: Orientace mikrofónů v sondě p-p.

Obr. 4.1: Princip planární NAH.

Obr. 4.2: Znázornění šíření rovinné vlny prostorem pomocí  $k$ -diagramu.

Obr. 4.3: Průběh exponenciálního okna pro váhování posloupnosti o 10000 vzorcích.

Obr. 4.4: Zperiodizování vstupního signálu.

Obr. 4.5: Průběh Tukeyova okna.

Obr. 4.6: Okénkování v časové oblasti Tukeyovým oknem.

Obr. 4.7: Průběh dvojitého exponenciálního Harrisova okna pro  $\alpha = 0,15$ .

Obr. 4.8: Princip cylindrické NAH, a) vnější úloha, b) vnitřní úloha.

Obr. 4.9: Průřez válcového pole kolmého na osu  $x$ .

Obr. 4.10: Princip sférické NAH, a) vnitřní úloha, b) vnější úloha.

Obr. 4.11: Sférická soustava souřadnic versus kartézská soustava.

Obr. 6.1: Mikrofon Behringer ECM 8000.

Obr. 6.2: Rozmístění rovin při měření.

Obr. 6.3: Praktická realizace mikrofonního pole.

Obr. 6.4: Grafické uživatelské rozhraní s příkladem vypočteného hologramu.

Obr. 6.5: Vývojový diagram aplikace.

Obr. 6.6: Chybová zpráva nesouhlasného počtu načtených souborů.

Obr. 6.7: Upozornění v případě chybného zadání počtu řádků a sloupců

Obr 6.8: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0,15$  m, vrstevnicové zobrazení, přímočará pila.

Obr 6.9: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0,15$  m, zobrazení typu barevná mapa, přímočará pila.

Obr 6.10: Rozložení akustického tlaku na měřicí rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0$ , zobrazení typu barevná mapa, přímočará pila.

Obr. 6.11: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, přímočará pila,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=400$  Hz.

Obr. 6.12: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, přímočará pila,  $z=0,4$  m,  $z_x=0,4$  m,  $f_{mez}=400$  Hz.

Obr. 6.13: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, větrák,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=500$  Hz.

Obr. 6.14: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, větrák,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=500$  Hz.

Obr. 6.15: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

Obr. 6.16: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,1$  m,  $z_x=0,1$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

Obr. 6.17: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,2$  m,  $z_x=0,2$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

Obr. 6.18: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_c=2000$  Hz,  $B=1000$  Hz.

Obr. 6.19: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_c=818$  Hz,  $B=1000$  Hz.

# 1 ÚVOD

Akustická holografie v blízkém poli (NAH – z angl. nearfield acoustical holography) je relativně nová technika, která může být použita pro bezkontaktní zobrazení akustických zdrojů [1], resp. zdrojů hluku. Jedno z praktických omezení techniky NAH je vysoký počet vzorků potřebných ke zpřesnění zobrazení na dostačující úroveň. K tomu je zapotřebí co nejvyššího počtu mikrofónů, což neúnosně navyšuje cenu zařízení. V neposlední řadě je nutno také zmínit značnou výpočetní náročnost metody. V tomto případě se jedná tedy o metodu měření akustického výkonu nebo tlaku v bodech [2]. Jako nejschůdnější se jeví varianta pohybujícího se řídkého pole mikrofónů, kterým se postupným skenováním docílí požadovaného rozlišení [1]. Dle [1] se tato metoda nazývá „translace“ a předpokládá zdroj stacionární. Další možností je použití jediné intenzitní sondy, která se pohybuje buď automaticky, nebo jí lze ovládat ručně [2] dle ČSN ISO 9614-2. Nevýhodou posledních dvou zmíněných postupů je nemožnost měření dynamických zdrojů hluku. Podle charakteru zdroje hluku resp. tvaru vlnoplochy jeho vlnění jsou pak známy tři druhy akustické holografie v blízkém poli (dále jen NAH): planární pro rovinné vlny, cylindrická pro válcové vlny a sférická NAH pro vlny šířící se po kulových vlnoplochách. Cílem této práce však nebude za každou cenu získat co nejpresnější zobrazení rozložení akustické intenzity v okolí zdroje hluku, ale především rozbor dostupných metod s následným ověřením funkčnosti planární NAH pomocí skriptu vytvořeného v prostředí Matlab. Jako vstupní data poslouží hodnoty akustických tlaků naměřených v bezodrazové komoře laboratoře studiové a hudební elektroniky, s předpokladem, že k dispozici bude pouze statické čtvercové/ obdélníkové pole o  $n$  mikrofónech, kde hodnotu  $n$  si bude moci uživatel skriptu zvolit v rozmezí 6 až 256. Na vstupu bude tedy  $n$  hodnot akustických tlaků, ke každé z nich příslušná dvourozměrná souřadnice a výstupem bude trojrozměrný hologram, popřípadě 2D graf, kde třetí rozměr bude vyjádřen příslušnou barvou. Uživatel bude mít dále možnost definovat vzdálenost měřící a predikované roviny od roviny zdroje, kmitočet, v jehož oblasti bude hluk analyzován a bude mít možnost zkalibrovat mikrofony pomocí tónového kalibrátoru a uložit tyto údaje do kalibračního souboru, který umožní přepočítat vstupní hodnoty na akustické tlaky. Výsledek nebude sice příliš přesný, ale pro případné následné experimentální ověření metody bude dostačující.

## 2 AKUSTICKÉ POLE A AKUSTICKÁ HOLOGRAFIE

Následující kapitola se zabývá nejprve základními teoretickými poznatky o zvukovém poli, které jsou pro další výklad nezbytné, posléze je diskutována tradiční akustická holografie versus akustická holografie v blízkém poli. V závěru kapitoly je podrobnější pojednání o účelu akustické holografie a analýzy hluku vůbec s ohledem na zdravotní rizika expozice člověka hlukem.

### 2.1 Akustické pole, základní pojmy a veličiny

Zvuk je subjektivní vjem sluchového orgánu a objektivně se jedná o střídavé zřed'ování a zhušť'ování molekul vzduchu (změny atmosférického tlaku) v blízkosti zdroje [3]. Zdroj zvuku je tuhé těleso, které vykonává kmitavý pohyb. Toto zhušť'ování/zřed'ování se v látkovém prostředí šíří do svého okolí v podobě zvukového vlnění. V případě bodového zdroje zvuku se vlnění šíří po kulové vlnoploše, v případě přímkového zdroje po vlnoploše válcové a v případě rovinného zdroje po vlnoploše rovinné. Vlnoplocha (nebo také čelo vlny) je tvořena body v prostoru, které kmitají při zvukovém vlnění se stejnou fází [3]. Rychlost šíření a charakter šíření zvukového vlnění závisí na charakteru prostředí, teplotě a vlhkosti. V plynném a kapalném prostředí se zvuk šíří pouze v podobě vlnění podélného, v pevných látkách pak také v podobě příčného vlnění [3]. Rychlost šíření zvuku v pevných látkách dosahuje hodnot v rozmezí cca 2000 - 5000 m/s, ve vodě 1440 m/s a ve vzduchu při teplotě 20° C a vlhkosti <50% 343 m/s [4]. Tato hodnota je též označována jako atmosférická rychlost zvuku a bude ve všech výpočtech dosazována za konstantu  $c$ . Za akustický tlak  $p$  je považována střídavá složka tlaku superponovaná na atmosférický tlak [3] a to v rozmezí kmitočtů akustického pásma, tj. cca 20 – 20000 Hz, jež představuje pásmo lidským uchem slyšitelných zvuků [3]. Toto pásmo je tedy předmětem zájmu, pokud je analyzován nějaký zdroj hluku. Další základní veličinou akustického pole je akustická rychlost  $v$ , definována dle [3] jako rychlost kmitavého pohybu částic prostředí, jímž se šíří akustické vlnění:

$$v = \frac{dy}{dt} \text{ [m/s]}, \quad (2.1)$$

kde  $y$  je okamžitá výchylka. Akustické zrychlení je dle [3] definováno

$$a = \frac{dv}{dt} [\text{m/s}^2]. \quad (2.2)$$

Dále je zapotřebí definovat pojem akustická objemová rychlost, která je dle [3]

$$w = v \cdot S [\text{m}^3/\text{s}] \quad (2.3)$$

a vyjadřuje objem pomyslného tělesa, které akustická vlna vytvoří za určitý čas. Např. je-li definován rovinný obdélníkový zdroj zvuku o ploše  $S$ , produkující rovinou vlnu, pak objem onoho tělesa je definován součinem vzdálenosti, jakou vlna urazí za daný čas  $t$  a plochy  $S$  vlnoplochy, resp. zdroje zvuku. Další veličinou akustického pole je akustická intenzita  $I$ , jež je definována dle [3] jako

$$I = P/S [\text{W/m}^2], \quad (2.4)$$

kde  $P$  je velikost akustického výkonu vyzářené vlny a  $S$  je plocha obklopující vlnu, přičemž směr šíření je normálou k této ploše. Akustická intenzita je tedy definována jako časová střední hodnota měřeného výkonu procházejícího plochou  $1 \text{ m}^2$ .

## 2.2 Akustická holografie a akustická holografie v blízkém poli

Pojem hologram poprvé zmiňuje v roce 1948 maďarský fyzik Dennis Gabor, jemuž je také objev holografie připisován [5]. Termínem hologram je vyjádřen „úplný záznam“. (Získaný hologram by tedy měl být úplným trojrozměrným obrazem akustického pole v okolí zdroje hluku). Akustická holografie si klade za cíl zrekonstruovat zvukové vlnění, které zdroj zvuku generuje.

Teoretickým základem pro akustickou holografii je klasická holografie- optická, jedná se o její analogii. Obdobnými postupy jako v optické holografii je tedy možno získat hologramy (interferenční obrazce) také pro vlnění akustické [6]. Velkou výhodou akustické holografie je možnost získat trojrozměrný obraz pouze z dvojrozměrného měření akustického pole v okolí zdroje zvuku [2].

Tradiční akustická holografie, kde měření probíhá ve vzdáleném poli, byla však postupem času mnohými odborníky opuštěna [7] s ohledem na omezené rozlišení, které je stejného řádu, jako je vlnová délka zdroje. V optické holografii tento problém neexistuje s ohledem na řádově mnohem menší vlnové délky. V akustice se ovšem vyskytují situace, kdy rozměr samotného zdroje zvuku je menší, než délka vlny, kterou

vyzařuje [7]. Jinými slovy, tradiční holografií lze zdroj hluku analyzovat ve značně frekvenčně (zdola) omezeném pásmu, lze zobrazit pouze takové detaily, které jsou větší nežli délka vyzařované akustické vlny [4]. Toto omezení bylo odstraněno vyvinutím nové metody, kterou je akustická holografie v blízkém poli – NAH (nearfield acoustical holography). Poprvé byla popsána v r. 1980 A. G. Williamsem a J. D. Maynardem. Její přínos spočívá v schopnosti řešení inverzního problému, tj. rekonstrukce zvukového vlnění na povrchu zdroje zvuku pomocí měření parametrů tohoto vlnění v některé rovnoběžné blízké rovině [4]. Tato metoda může rekonstruovat nikoliv pouze akustický tlak, ale také vektor rychlosti šíření akustické vlny a vektor akustické intenzity [4]. Zvukové vlnění v blízkosti zdroje zvuku může být vyjádřeno jako nekonečný počet vln určitého tvaru a to buď válcového (cylindrického), kulového (sférického), ale nejčastěji rovinného (planárního) [6]. Protože v laboratorních podmínkách bude případně nadále možno pracovat pouze s plošnou strukturou mikrofónů, bude většina následujícího rozboru problematiky zaměřena na planární NAH a tedy rovinné vlny, další možnosti pak budou uvedeny spíše v informativním rozsahu.

Nezákladnější rovnicí pro akustickou holografii je vlnová homogenní rovnice [4]:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0, \quad (2.5)$$

kde  $p(x, y, z, t)$  je nekonečně malá změna akustického tlaku z jeho rovnovážné hodnoty [4],  $c$  je rychlost šíření zvukových vln v médiu operátor  $\nabla^2$  je Laplaceův operátor (lze psát též  $\Delta$ ). Pravá strana rovnice vyjadřuje, že počet zdrojů v prostoru, kde je rovnice platná, musí být nulový. Druhou stěžejní rovnicí je Eulerova rovnice:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\vec{\nabla} p, \quad (2.6)$$

kde  $\vec{v}$  představuje vektor rychlosti ( $\vec{v} = \hat{i}u + \hat{j}v + \hat{k}w$ ),  $\rho_0$  je hustota prostředí. Zde složky  $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$  jsou jednotkovými vektory ve směru os v kartézském souřadnicovém systému,  $p$  je akustický tlak.

Z vlnové homogenní rovnice a Greenovy věty lze nadále odvodit Helmholtzovu-Huygensovu rovnici (Helmholtzův-Huygensův integrál) [8]. Odvození je poměrně náročné a je podrobně popsáno v [8], tato práce se jím nebude zabývat. Pro další postup postačí poznatek dle [2]: *Z Helmholtzovy-Huygensovy rovnice vyplývá, že k tomu, abychom rekonstruovali zvukové pole vně plochy obklopující zdroj zvuku, musíme znát rozložení veličin pole na této ploše.* Integrál je v praxi pak aproximován

sumací. Aby však bylo možno hovořit o akustické holografii v blízkém poli, musí měření splňovat tuto základní podmínku: pole mikrofónů nesmí být ve vzdálenosti od zdroje hluku větší než  $\lambda/2$  nejkratší vyzařované nebo sledované vlny. Pakliže tato podmínka není splněna, jedná se o měření ve vzdáleném poli [6]. Rozdíl mezi těmito dvěma oblastmi spočívá ve způsobu šíření vln v prostoru. V případě blízkého pole oblast obsahuje dva typy vlnění: 1) vlnění netlumené – tzv. propagační vlny, které však mění svojí fázi. Ztráty šířením v médiu jsou tedy zanedbatelné a amplituda se nemění s rostoucí vzdáleností od zdroje 2) vlnění tlumené – evanescentní (amplituda klesá v prostoru s rostoucí vzdáleností), které svoji fázi nemění [6]. Zde je nutno pojmy nezaměňovat s vlněním tlumeným/ netlumeným v čase, s kterými se lze setkat např. při studiu oscilátorů.

Důležitou veličinou v akustické holografii je okamžitá akustická intenzita [4], resp. vektor intenzity. V časové oblasti je nazýván okamžitá akustická intenzita a je definována vztahem [4]

$$\vec{I}(t) = p(t)\vec{v}(t), \quad (2.7)$$

Kde  $\vec{v}$  je vektor rychlosti a  $p$  akustický tlak. Pro ilustraci bude uvažováno působení této intenzity na nekonečně malé plynné těleso tvaru krychle. Jednotkou okamžité akustické intenzity jsou buď  $\text{J/s/m}^2$  nebo  $\text{W/m}^2$ . Hustotu energie lze pak vyjádřit pomocí divergovaného vektoru akustické intenzity (působením operátoru nabla  $\vec{\nabla}$ ) [4]:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot \vec{I}, \quad (2.7)$$

tedy platí

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\left(\frac{\partial I_x}{\partial x} + \frac{\partial I_y}{\partial y} + \frac{\partial I_z}{\partial z}\right), \quad (2.8)$$

pak je hustota energie definována [4]:

$$e = \frac{1}{2}\rho_0|\vec{v}(t)|^2 + \frac{1}{2}\kappa p(t)^2, \quad (2.9)$$

kde  $\kappa$  je koeficient stlačitelnosti plynu. Rovnice (2.7) ukazuje, jak je indikován nárůst hustoty energie uvnitř tělesa negativní divergencí vektoru akustické intenzity [4]. Vektory intenzity tedy směřují do oblasti nárůstu hustoty energie.

Pro rekonstrukci zvukového pole v blízkosti zkoumaného objektu se obvykle používají algoritmy  $k$ -space filtru, které vyžadují prostorovou transformaci do oblasti (domény) vlnových čísel, ve které teprve proběhne filtrace [6]. Tento filtr funguje jako

dolní propust realizovaná metodou váhovací posloupnosti pomocí váhovacího okna (podrobněji v podkapitole 4.1.2).

## 2.3 Účel akustické holografie

Vzhledem k tomu, že současná doba do lidského života přináší stále více moderní technologie, je nutno se též zabývat otázkou, jaké dopady má její provoz na lidské zdraví. Zejména v oblasti strojní výroby, stavebnictví, dopravy, ale i volného času, je jedním z nejdůležitějších faktorů působících na člověka hluk, zejména pak impulzní hluk. Se vzrůstajícím množstvím přístrojů a strojů v okolí člověka narůstá tedy požadavek na optimalizaci jejich hlučnosti.

Za škodlivou hranici je považována hladina akustického tlaku 85 dB [3]. Po začátku působení hluku na sluchový orgán nastává dočasný posun prahu slyšení směrem nahoru a hluk je vnímán s nižší intenzitou. Tento stav trvá po celou dobu působení hluku. Maximum posunu prahu slyšení nastává během první minuty a po skončení působení hluku se vrací do normálu [3]. Pokud hluk trvá déle než 1 minutu, nastane u exponované osoby sluchová únava. Ta se projevuje kromě posunu prahu slyšení také sníženou schopností rozlišení posunu kmitočtu, hlasitosti a maskování [3]. Odeznívání sluchové únavy trvá déle, než v případě krátkodobé expozice (do 1 min) a tato doba závisí především na intenzitě hluku, jeho spektru a může dosahovat hodnot v řádu hodin [3]. Pakliže je exponovaná osoba hluku vystavována pravidelně a dlouhodobě, schopnost regenerace zvukového orgánu se snižuje a nastává nevratné poškození sluchu. To se projevuje jako postupné zvyšování prahu slyšení až k nedoslýchavosti, jako první známkou tohoto jevu je oslabení citlivosti sluchu na vyšších kmitočtech [3]. Člověk s takovýmto prvotním poškozením sluchu se nejprve potýká s šelestem v uších po ukončení hlukové expozice (např. po pracovní směně), později obtížněji vnímá sykavky a mluvený projev se pro něho tak stává méně srozumitelným. Citelná míra poškození sluchu nastává při hladině akustického tlaku okolo 100 dB po 7 až 10 letech [3]. Nejzranitelnějším je sluchový orgán pro krátkodobé impulzní hluky (výstřel, třesk, výbuch), kdy se adaptační schopnost lidského sluchu nestihne uplatnit. Dle [3] byl prokázán též negativní vliv hluku na lidský organizmus i v mimo-sluchové oblasti a to již při hladinách 50 dB(A). Jedná se o změny duševního stavu člověka a v dlouhodobém měřítku jeho celkové duševní zdraví. Pracovník vystavený hluku může mít tak sníženou



schopnost soustředění, úsudku nebo přesnost pracovního výkonu. Dlouhodobě může být hlukem vyvolána také neuróza. Hladiny intenzity hluku nad 65 dB(A) mohou ovlivnit dokonce i oblast autonomního vegetativního nervstva a tak i činnost hladkého svalstva člověka [3].

Důvodem analýzy hluku a vibrací je tedy vyhodnocení hlukových vlastností zkoumaného stroje za účelem jejich optimalizace. Kromě eliminace negativních vlivů na lidský organizmus je v současnosti také důraz kladen na zvýšení komfortu uživatelů (např. hluk uvnitř kabiny automobilu).

## 3 MĚŘÍCÍ PROSTŘEDKY V AKUSTICKÉ HOLOGRAFII

Jak již bylo poznamenáno, pro měření akustických veličin v akustické holografii je používáno jednak kalibrovaných mikrofonů, mikrofonových polí ale také speciálních akustických intenzitních sond [6]. Následující kapitola poskytuje přehled některých v současné době vyráběných mikrofonů a sond a stručně pojednává o principu jejich funkce.

### 3.1 Mikrofony

Pro měření akustického tlaku (tedy skalární veličiny) postačí použití mikrofonu. Vzhledem ke své vyrovnané kmitočtové charakteristice je obvykle používán elektrostatický měnič. Jeho impedance má kapacitní charakter, principiálně se jedná totiž o kondenzátor. Nevýhodou tohoto měniče je však nutnost polarizačního napětí, které se běžně u kvalitních měřících mikrofonů pohybuje v řádu až stovek voltů.

Klíčovými parametry mikrofonu pro měření metodou NAH jsou jednak amplitudová a fázová kmitočtová odezva a jednak vlastní šum (zde je nutno zahrnout i šum zesilovače) [6]. Akustická holografie obecně je značně citlivá na vzájemné odchylky parametrů mikrofonů použitých ve snímacím poli [6]. Pro eliminaci těchto odchylek je možno využít kompenzaci, kdy jsou charakteristiky každého jednoho mikrofonu uloženy v databázi a při výpočtu se jejich odchylky korigují. Při měření je nutno počítat s polohovou chybou mikrofonů v důsledku konstrukčních nepřesností, amplitudovou chybou, fázovou chybou, difrakcí od okolních mikrofonů, chybou A/D převodníku a chybou způsobenou nesoučasným vzorkováním.

V praxi se lze často setkat s mikrofony fy. Brüel & Kjær, pro použití v měřících mikrofonních polích jsou vhodné např. typy 4958 a 4961 [9]. Typ 4958 vykazuje citlivost 12,5 mV/ Pa, kmitočtový rozsah 10 Hz až 20 kHz, dynamický rozsah 28 až 140 dB a rozsah pracovních teplot -10°C až +55°C. Zajímavější je z hlediska technických parametrů druhý zmiňovaný typ, jeho kmitočtový rozsah činí 5 Hz až 20 kHz, citlivost je 65 mV/ Pa, dynamický rozsah 20 až 130 dB a rozsah pracovní teploty -20 až +80 °C. Oba zmíněné typy vykazují velmi vyrovnanou kmitočtovou charakteristiku.



Obr. 3.1: Mikrofon Brüel & Kjær, typ 4961.

Další zajímavý příklad mikrofonu téhož výrobce je na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Mikrofon 4193 fy. Brüel & Kjær.

Tento typ slouží především k měření obecně zvuků a infrazvuků o vysoké intenzitě [9], jako jsou např. výbuchy, střelba apod. Jeho polarizační napětí je 200V, citlivost 12,5 mV/ Pa a kmitočtový rozsah 0,07 Hz až 20 kHz. Velmi zajímavý je také dynamický rozsah tohoto mikrofonu: 19 až 162 dB [9] a pracovní teplota v rozmezí -30°C až +300°C. Membrána i ochranná mřížka jsou vyrobeny z nerezové oceli.

Při využití mikrofonních polí pro identifikaci zdrojů hluku je nutno zohlednit omezení těchto polí v závislosti na jejich hustotě a rozteči mikrofonů. Dle [10] je omezení měřitelného kmitočtu dáno vztahem

$$f_{\max} = \frac{c}{2d} \text{ [Hz]}, \quad (3.1)$$

kde  $d$  je rozteč mikrofonů a  $c$  je rychlost šíření akustického vlnění.

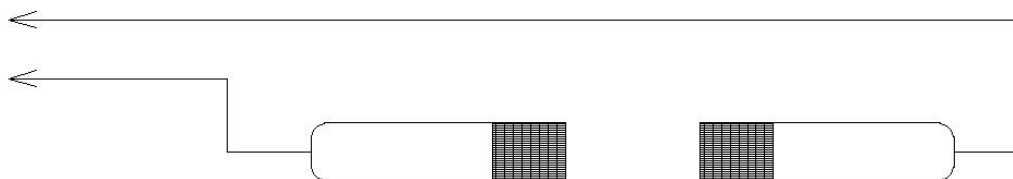
## 3.2 Intenzitní sondy

Tato složitější zařízení se využívají všude tam, kde je zapotřebí získat nejen údaj o velikosti vektoru akustické veličiny, ale i o jeho směru. Pro měření akustické intenzity byla vyvinuta tzv.  $p - p$  sonda, což je kalibrovaný mikrofonní pár [6]. Zařízení je osazeno dvěma tlakovými mikrofony umístěnými blízko u sebe, v jedné ose naproti sobě (viz. obr. 3.4). Průměrný akustický tlak je potom zjištěn ze součtu obou mikrofonních signálů [6]. Akustickou intenzitu lze potom spočítat z imaginární části křížového spektra těchto signálů a to s použitím dvoukanálového akustického analyzátoru [6]. Příklad  $p - p$  sondy B&K je na Obr. 3.3:



Obr. 3.3: Sonda p – p, Brüel & Kjær, typ 3595.

Pokud je zapotřebí změřit také vektor rychlosti pohybu částic vyvolaného akustickým vlněním, je využívána sonda p – u. Ta obsahuje jednak obyčejný elektretový mikrofón a jednak senzor rychlosti pohybu částic [9], který byl vyvinut firmou Microflown. Tento senzor pracuje na termálním principu a skládá se ze dvou blízko sebe umístěných drátků ze silikonového nitridu pokrytých tenkou vrstvou platiny [9]. Průměr těchto vodičů činí cca  $0,5\ \mu\text{m}$ , vzdálenost mezi nimi je  $40\ \mu\text{m}$  a jejich délka je 1 mm. Těmito vodiči protéká stejnosměrný proud, který je zahřívá na teplotu okolo  $300^\circ\text{C}$ . Pokudliže v blízkosti sondy je zdroj akustického vlnění, jehož rychlost je kolmá k výše popsanému systému, začnou se rozžhavené vodiče ochlazovat. Z rozdílu jejich aktuálních odporů (závislých na teplotě) je posléze vypočítána požadovaná velikost rychlosti [6].



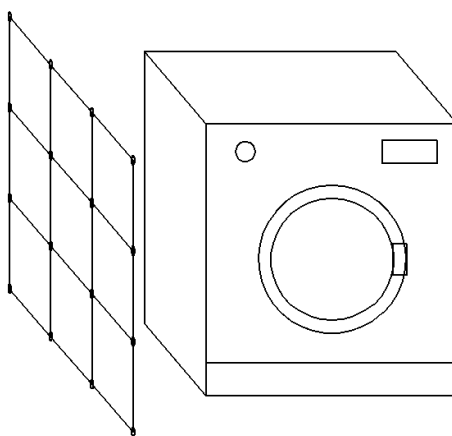
Obr. 3.4: Orientace mikrofónů v sondě p-p.

Sonda p – p B&K 3595 (viz obr. 3.3) obsahuje také mikrofonní předzesilovač a její mechanické uspořádání zaručuje minimální odrazy od jejího povrchu a difrakci zvukové vlny [9]. Mikrofony pro tuto sondu jsou párovány podle amplitudové i fázové odezvy.

## 4 DRUHY AKUSTICKÉ HOLOGRAFIE V BLÍZKÉM POLI

### 4.1 Planární holografie

U zkoumaných zdrojů hluku, kde předpokládáme zvukové vlnění s přibližně rovinnými vlnoplochami, by měla být použita holografie planární. Základním výpočetním prostředkem pro implementaci této metody bude vzhledem ke své rychlosti DFT – diskrétní Fourierova transformace a FFT – rychlá Fourierova transformace [4].



Obr. 4.1: Princip planární NAH.

Na základě znalosti fázového spektra zvukového vlnění a tlaku na určité ploše lze definovat velikost tlaku i vektor rychlosti na jakékoli jiné ploše ležící v prostoru bez dalších akustických zdrojů [4]. Pokud jsou tedy zdroje zvukového vlnění uzavřeny v poloprostoru  $z \leq z_s$ , kde  $z_s$  je souřadnice  $z$  rovinného zdroje zvuku, a je-li zároveň znám tlak na měřicí rovině  $z = z_h \geq z_s$ , potom platí pro akustický tlak na libovolné jiné rovině vztah [4]:

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z_h) e^{jk_z(z-z_h)}, \quad (4.1)$$

kde předpokládaný směr šíření je ve směru osy  $z$ . Pro normálovou složku rychlosti pak platí

$$\dot{W}(k_x, k_y, z) = \frac{k_z}{\rho_0 c k} e^{jk_z(z-z_h)} P(k_x, k_y, z_h) = G(k_x, k_y, z - z_h) P(k_x, k_y, z_h), \quad (4.2)$$

kde  $G$  je

$$G(k_x, k_y, z - z_h) \equiv \frac{k_z}{\rho_0 c k} e^{jk_z(z - z_h)}, \quad (4.3)$$

což je tzv. propagátor rychlosti, kde  $\rho_0$  je hustota prostředí a  $k$  je vlnové číslo. To je definováno dle [6] jako

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}, \quad (4.4)$$

kde  $\lambda$  je vlnová délka a  $\omega$  úhlový kmitočet. Mezi jednotlivými složkami  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  platí vztah

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2. \quad (4.5)$$

Hodnoty  $z$  a  $z_h$  jsou zvláště důležité: pakliže  $z \geq z_h$ , řešením je dopředný problém a  $G$  je přímý propagátor. Pokud však platí  $z \leq z_h$ , řešením je inverzní problém [4]. Jinak řečeno, pokud je měřicí pole ve vzdálenosti  $z = z_h$ , pak řešení pro tlak na ploše bližší ke zdrojům zvuku vyjadřuje, jaký tlak musel v dané ploše být před dosažením měřicí plochy.  $G$  je potom inverzní propagátor rychlosti [4].

Nyní bude stanovena rovina  $z = z_h$  rovinou měřicí a rovina k ní rovnoběžná  $z = z_s$ , což je rovina povrchu zvukového zdroje. Dle literatury [4] pak platí vztah:

$$p(x, y, z_h) \Rightarrow \dot{\omega}(x, y, z_s), \quad (4.6)$$

kde platí  $z_h \geq z_s$ . Matematické operace potřebné v NAH lze shrnout do rovnice [4]:

$$\dot{\omega}(x, y, z_s) = p(x, y, z_h) ** g_v^{-1}(x, y, z_s - z_h), \quad (4.7)$$

kde  $**$  značí dvojdimenzionální konvoluci. V (4.7)  $g_v^{-1}$  značí inverzní propagátor rychlosti, který je definován [4]

$$g_v^{-1}(x, y, z_s - z_h) \equiv F_x^{-1} F_y^{-1} \left[ \frac{k_z}{\rho_0} e^{jk_z(z_s - z_h)} \right]. \quad (4.8)$$

Postup dle (4.7) lze popsat několika body [4]:

- 1) Změření akustického tlaku  $p(x, y, z_h)$  v rovině blízké k rovině zdroje zvuku.
- 2) Výpočet spektra  $P(k_x, k_y, z_h)$  změřeného akustického vlnění.
- 3) Vynásobení spektra inverzním propagátorem  $G(k_x, k_y, z_s - z_h) \rightarrow \dot{W}(k_x, k_y, z_s)$ .
- 4) Výpočet zpětné transformace  $\dot{W}(k_x, k_y, z_s) \rightarrow \dot{\omega}(x, y, z_s)$

S ohledem na skutečnost, že NAH řeší inverzní problém, je třeba k výpočtům přistupovat s opatrností: je nutno se ujistit, že výsledný stav je ustálený a jednoznačný. Znalost způsobu úpravy rovnice (4.7) do takové podoby, aby ji bylo možno úspěšně implementovat, je základním stavebním kamenem techniky NAH [4].

#### 4.1.1 Jednorozměrný zdroj zvuku

Pro snazší objasnění problematiky bude nyní uvažován případ jednorozměrného zdroje zvuku. Předpokladem takového zdroje je nezávislost měřeného zvukového pole na ose  $y$ , bude tedy definováno pouze souřadnicemi  $x$  a  $z$  [4]. Nutno zdůraznit, že je stále řeč o vlnách rovinných. Na ploše  $z = z_s$  tedy leží plošný zdroj zvukového vlnění, akustický tlak je měřen na ploše  $z = z_h$ , kde ovšem  $z_h \geq z_s$ . Vzhledem k nezávislosti akustického vlnění na ose  $y$  lze tedy napsat:

$$p(x, y, z_h) \rightarrow p(x, z_h). \quad (4.9)$$

Nyní pomocí zjištění fázového spektra lze rekonstruovat zvukové pole na ploše zdroje, tzn.  $z = z_s$ :

$$F_x F_y [p(x, z_h)] = 2\pi P(k_x, k_y, z_h) \delta(k_y), \quad (4.10)$$

kde  $\delta$  je Diracova funkce, která vznikne transformací  $y$ . Díky delta funkci pak vypadá zpětná Fourierova transformace takto:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(k_x, k_y, z_h) G(k_x, k_y, z_s - z_h) 2\pi \delta(k_y) e^{jk_y y} dk_y = P(k_x, 0, z_h) G(k_x, 0, z_h) \quad (4.11)$$

Jednorozměrný zdroj zvukového vlnění je tím pádem ekvivalentní pro vyhodnocování fázového spektra a propagátoru rychlosti v  $k_y = 0$ , což také odpovídá nekonečné vlnové délce ve směru osy  $y$  [4]. Rovnice (4.7) je nezávislá na transformaci v ose  $y$ , transformační rovnice je tedy dle [4]:

$$\hat{\omega}(x, z_s) = F^{-1} [F_x [p(x, z_h)] G(k_x, 0, z_s - z_h)], \quad (4.12)$$

důležitý je zde inverzní rychlostní propagátor  $G$ , který bude po úpravě (4.3):

$$G(k_x, 0, z - z_h) = \frac{k_z}{\rho_0 c k} e^{-jk_z(z_h - z_s)} \quad (4.13)$$

Exponenciální člen v této rovnici však vede na  $e^{-jk_z(z_h - z_s)} = e^{k_z^l(z_h - z_s)}$  a tento člen násobí měřené spektrum a tak jej zkresluje. Čím více se blíží  $k_x$  k nekonečnu, blíží se

k nekonečnu i inverzní propagátor rychlosti  $G$  [4]. V takovém případě by však výsledky byly zcela znehodnoceny. Aby tedy zůstal součin  $G(k_x, 0, z_s - z_h)P(k_x, 0, z_h)$  konečný, je nutno předpokládat, že amplitudy spektrálních složek klesají rychlejším tempem s  $k_x$  než rychlostní propagátor. To zaručuje rovnice spektra subsonického vlnění (viz [6]).

Tuto rovnováhu však může mimo vlivy popsané výše zásadně narušit bílý šum, jehož spektrální hustota výkonu je v celé šíři spektra rovnoměrně rozložena. Předpokládaný vliv takového rušení lze ověřit výpočtem, s použitím náhodného procesu s rovnoměrným rozložením pravděpodobnosti. Tento důkaz je podrobně rozebrán v [4]. Důsledek působení šumu je takový, že kvadrát absolutní hodnoty rychlostního propagátoru má tendenci výrazně stoupat se stoupajícími vlnovými čísly. Měření je tak nevyhnutelně znehodnoceno.

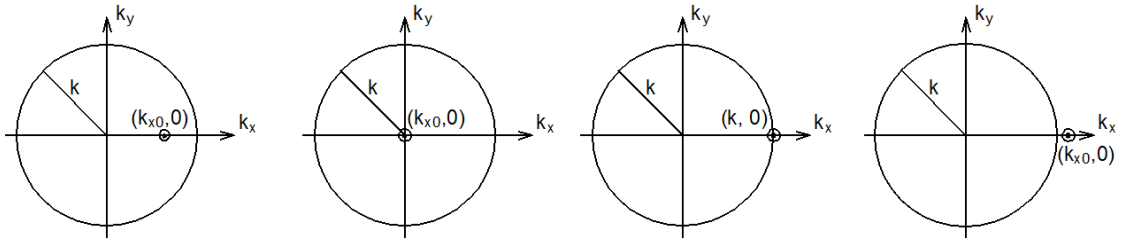
#### 4.1.2 K-prostor a $k$ -space filtr

Jak již bylo naznačeno, výpočetní operace vedoucí k rekonstrukci zvukového pole na zdroji probíhají v oblasti vlnových čísel, která se též nazývá  $k$ -prostor [4]. Jde o nový prostor, jenž vznikne z metrického Eukleidovského  $r$ -prostoru Fourierovou transformací [11]. Názvy prostorů jsou odvozeny od jejich prostorových vektorů  $(\mathbf{r}, \mathbf{k})$ . Transformace do domény vlnových čísel se provádí pomocí DFT a je jednou z více možností postupů výpočtu, další metody budou popsány v kapitole 5. Smysl transformace spočívá ve zjednodušení aplikace NAH algoritmu, v oblasti vlnových čísel se získané vzorky pouze násobí zpětným propagátorem (Greenova funkce), zatímco v časové oblasti by bylo nutno použít konvoluce. Před vynásobením spektra zpětným propagátorem je nutno provést filtraci  $k$ -filtrem, která zamezí aliasingu a následuje zpětná DFT (viz dále).

Pro zobrazení vlny v  $k$ -prostoru (tedy v oblasti vlnových čísel) se obvykle využívá kružnicového  $k$ -diagramu, kde  $k$  představuje poloměr kružnice. Kružnice je zde rovinným průmětem tohoto prostoru, který má ve skutečnosti tvar polokoule. Na diagramu jsou vyneseny tedy osy  $k_x, k_y$  a orientace vektoru  $\mathbf{k}$  v prostoru (tedy vyjádření jeho souřadnice  $z$ ) je naznačena bodem v kroužku: jde o umístění vlnového čísla. Na obr. 4.2 jsou naznačeny některé případy šíření rovinné vlny v prostoru. Zleva je to nejprve šíření vlny rovinou  $\rho(x, z)$ , přičemž směr šíření svírá s těmito osami úhel  $45^\circ$ , dále vlnění šířící se ve směru osy  $z$ , vlnění šířící se ve směru osy  $x$  a na závěr vlnění



evanescentní, šířící se ve směru osy  $x$  [4]. Fakt, že se jedná o evanescentní vlnu, je vždy indikován výskytem vlnového čísla vně kružnice  $k$ -diagramu.



Obr. 4.2: Znáznornění šíření rovinné vlny prostorem pomocí  $k$ -diagramu.

V tomto nově vzniklém prostoru je však nutná implementace nějakého filtru, který odstraní vliv šumu a to potlačením nežádoucích vysokých kmitočtů. Tento filtr se nazývá, jak již bylo zmíněno výše,  $k$ -space filtr [6] a má charakter dolní propusti.

Z pohledu  $k$ -prostoru tento filtr určuje, jak daleko za hraniční kružnicí  $k$ -diagramu se data ještě zahrnují do výpočtu, a kde už ne [4]. Cílem je snížit podíl velmi vysokých vlnových čísel omezením úhlového spektra a tak snížit i výpočetní náročnost procesu a eliminovat vliv šumu. Vždy je třeba volit kompromis: je žádoucí získat obraz (hologram) s co nejvyšším rozlišením, ale zároveň nezatěžovat výpočetní systém hodnotami, které již nevedou k zpřesnění detailů, nýbrž k zašumění hologramu. Tuto operaci lze vyjádřit vztahem:

$$\tilde{P}(k_x, 0, z_h) \Pi \left[ \frac{k_x}{2k_c} \right] G(k_x, 0, z_s - z_h), \quad (4.14)$$

kde je použito obdélníkového okna (zn.  $\Pi$ ) ohraničeného  $k_x = k_c$ . Mezní kmitočet filtru odpovídá parametru  $k_c$ . Součin  $\Pi G$  zůstane konečný i pro velké  $k_x$  a je tak držen v určitých mezích [4]. Vlastní volba mezního kmitočtu  $k$ -filtru je zásadní pro správnou rekonstrukci měřeného zvukového pole. Problém je názorně demonstrován na příkladu v [4]: rychlost  $\tilde{\omega}(x, z_s) \equiv \tilde{\omega}(x)$  představuje poškozený rekonstruovaný vektor v důsledku nesprávně zvoleného filtru (šum se v tomto případě nevezme vůbec v úvahu). Rovnice rekonstrukce bude dle [4]:

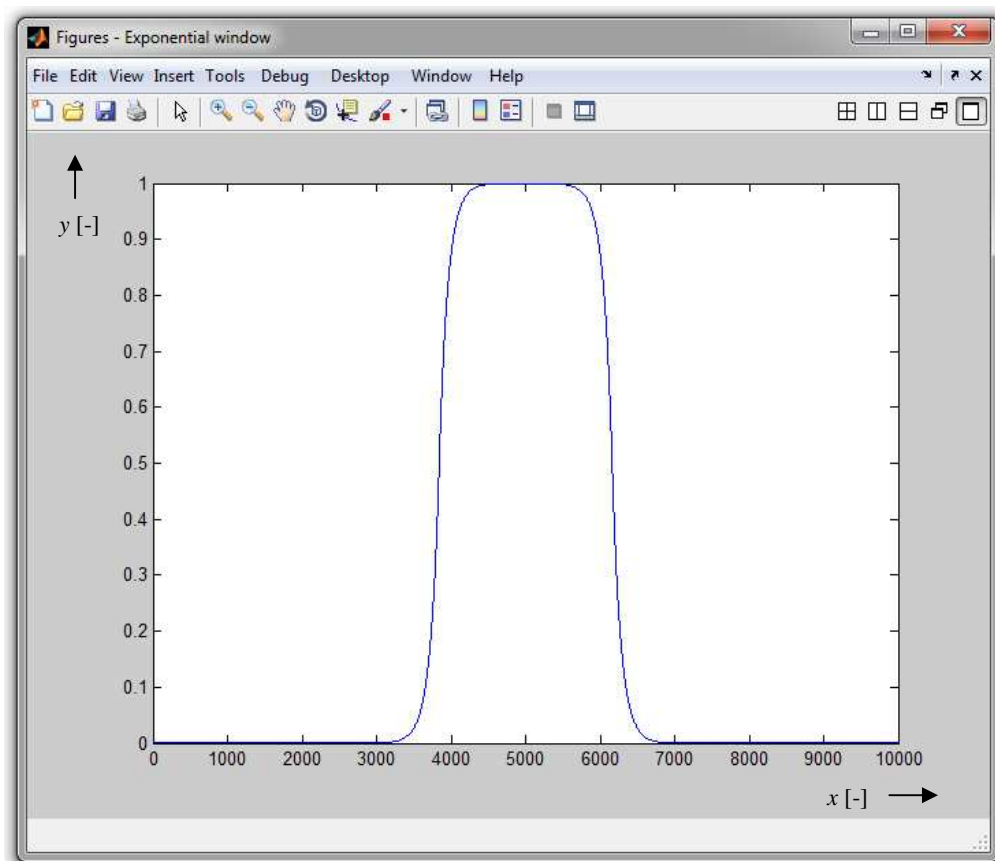
$$\begin{aligned} \tilde{\omega}(x) &= F^{-1} [F_x [p(x, z_h)] G(k_x, 0, z_s - z_h) \Pi[k_x / (2k_c)]] \\ &= F^{-1} [P[p(k_x, 0, z_h)] G(k_x, 0, z_s - z_h) \Pi[k_x / (2k_c)]] \end{aligned} \quad (4.15)$$

Dopady použití obdélníkového okna na rekonstruovanou rychlost jsou tyto: prostorová vlnová délka odpovídající  $k_c$  je  $\lambda_c = \frac{2\pi}{k_c}$ .  $K$ -space filtr potlačuje všechny vlnové délky kratší než  $\lambda_c$ , na hologramu nebudou ovšem zobrazeny detaily menších rozměrů než je  $\lambda_c / 2$  [4]. Pakliže rozsah vlnových čísel povrchové rychlosti zdroje je omezen tak, že  $k_x < k_c$ , obdélníková funkce se nijak neprojeví. To však pouze za podmínky, že  $P(k_x, 0, z_h)$  již je pásmově omezen.

Účinek použití obdélníkového okna se projeví teprve tehdy, nachází-li se některá vlnová čísla mimo oblast okna [4]. Problémem filtru realizovaného pomocí obdélníkového okna jsou však zákmity na okrajích rekonstruovaného signálu, jelikož zpětnou transformací obdélníkového průběhu je funkce sinc. To lze eliminovat úpravou okna, resp. použitím okna jiného tvaru. V akustické holografii se pro  $k$ -space filtr nejčastěji využívá Harrisova exponenciálního dvourozměrného okna [6]. Parametry filtru závisí na míře šumu snímaného s měřenými veličinami. Harrisovo okno je definováno pomocí rovnice dle [4]:

$$\overline{\Pi}\left(\frac{k_x}{2k_c}\right) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} e^{-(1-|k_x|/k_c)/\alpha} & |k_x| < k_c \\ \frac{1}{2} e^{(1-|k_x|/k_c)/\alpha} & |k_x| > k_c \end{cases} . \quad (4.16)$$

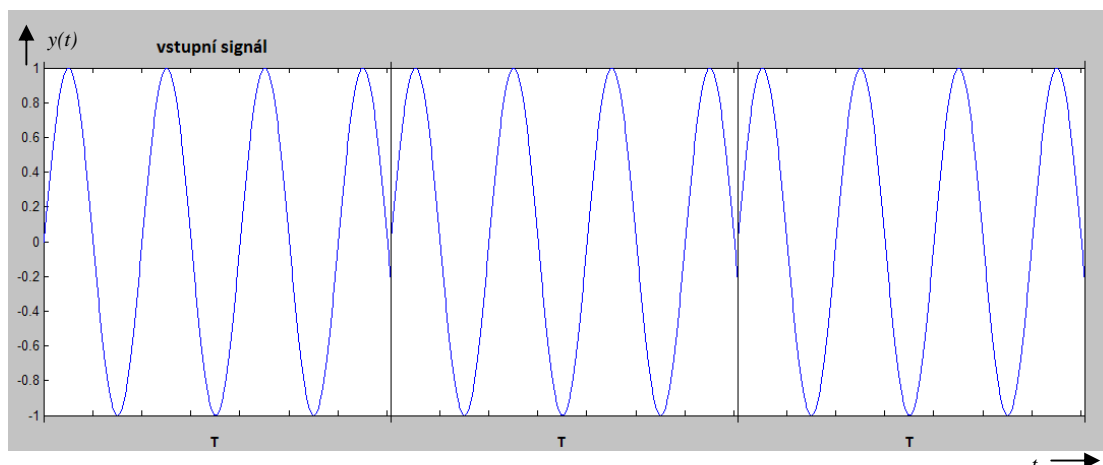
Značka  $\overline{\Pi}$  je zde převzata z [4] a je zvolena s ohledem na podobnost Harrisova okna s obdélníkovým. Parametr  $\alpha$  určuje strmost filtru, kdy s klesajícím činitelem strmosti filtru  $\alpha$  strmost filtru stoupá. Dle [6] je obvykle volena hodnota  $\alpha$  okolo 0,2. Průběh exponenciálního okna pro  $\alpha = 0,15$  dle rovnice (4.16) je znázorněn na obr. 4.3.



Obr. 4.3: Průběh exponenciálního okna pro váhování posloupnosti o 10000 vzorcích.

### 4.1.3 Spektrální prosakování

Spektrální prosakování je jevem charakteristickým pro transformaci do oblasti vlnových čísel [6] a je způsobeno nespojitostmi na okrajích vstupního signálu. To je dáno touto vlastností Fourierovy transformace, že vstupní krátkodobý signál je zperiodizován a na rozhraních jednotlivých period vznikají nespojitosti produkující vysoké kmitočtové složky:



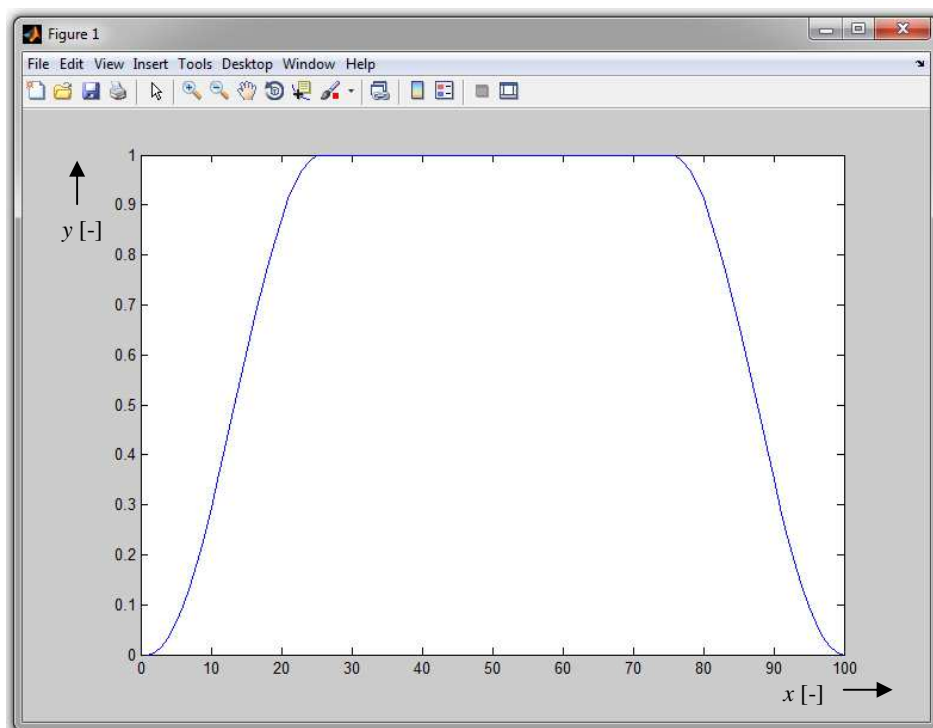
Obr. 4.4: Zperiodizování vstupního signálu.

Ve spektru se tato skutečnost projeví rozmazáním spektrálních čar [12], část energie dané složky se tak přesouvá do okolí spektrální čáry, ale celková energie zůstává zachována [12]. Rozlišovací schopnost Fourierovy transformace v kmitočtu je úměrná délce jedné periodizace, což odpovídá periodě  $T$  v obr. 4.3. Délkou periodizace je míněn počet vzorků  $N$  této periodizace [12]. Se zvyšováním rozlišovací schopnosti prodlužováním periodizace je zvyšována také výpočetní náročnost DFT. Fourierova transformace je schopna rozlišit kmitočty od sebe vzdálené  $\Delta f = f_{vz} / N$  [12]. Pakliže délka vstupního signálu neumožňuje dosáhnout požadovaného rozlišení, lze docílit zpřesnění přidáním nul do posloupnosti vstupních hodnot tohoto signálu a tím navýšit velikost  $N$  [6]. Jednou z možností umělého přidání nul je vynásobení původně nekonečného signálu obdélníkovým oknem [12] v časové oblasti, což však přináší určitá úskalí (viz níže).

Pokud bude zajištěna vstupní perioda Fourierovy transformace taková, že bude celistvým násobkem periody periodizovaného signálu, problém prosakování bude eliminován [13]. To je možno využít pro signál s harmonickými složkami se stejnými počátečními fázemi. Takové podmínky samozřejmě nelze v praxi zajistit, jelikož analyzované hlukové signály mají spektrum bohaté na harmonické složky o různých počátečních fázích. Je nutno zvolit tedy jiný přístup a to vyhlazení kritických ostrých přechodů nějakou funkcí.

Pro odstranění tohoto nežádoucího jevu lze využít metodu okénkování v časové oblasti [12]. Vstupní posloupnost vzorků konečné délky, která má být následně zperiodizována, se vynásobí charakteristikou vhodného okna, čímž jsou eliminovány

ostré přechody. Dle [6] je vhodným typem okna např. Tukeyovo okno. Jeho průběh vykreslený pomocí Matlabu je dle [6] znázorněn na obr. 4.5.



Obr. 4.5: Průběh Tukeyova okna.

Pro praktický výpočet s diskrétními signály je nutno zajistit, aby posloupnost hodnot Tukeyova okna měla stejnou délku jako posloupnost hodnot vzorků vstupního signálu. Každý vstupní vzorek je poté násoben příslušnou hodnotou Tukeyova okna z intervalu  $<0,1>$  dle jeho průběhu (viz obr. 4.5). Výsledná posloupnost je posléze zperiodizována již bez nežádoucích hran a výpočet není zatížen nesmyslnými vysokými hodnotami. Proces okénkování je znázorněn na obr. 4.6, hodnoty Tukeyova okna byly vygenerovány pomocí Matlabu.

vstupní signál	0.3	0.8	1	0.6	-0.2	-0.8	-1	-0.7	-0.1	0.2	0.6	0.9	0.5	-0.3
<b>X</b>														
Tukeyovo okno	0	0.22	0.68	0.99	1	1	1	1	1	0.99	0.68	0.22	0	
↓														
upravený signál	0	0.17	0.68	0.59	-0.2	-0.8	-1	-0.7	-0.1	0.2	0.59	0.61	0.11	0

Obr. 4.6: Okénkování v časové oblasti Tukeyovým oknem.

#### 4.1.4 Měřicí vzdálenost a mezní kmitočet k-filtru

##### Měřicí vzdálenost

Kromě šumových podmínek, respektive odstupu signál/ šum je hodnota  $k_c$  limitována také vzdáleností měřicího pole od zdroje, tedy rozdílem  $z_h - z_s$ . Již v úvodní kapitole byla zmíněna podmínka pro NAH, tedy že vzdálenost měřicího pole od zdroje vlnění musí být menší než  $\lambda/2$  nejkratší vyzařované vlny, popřípadě nejkratší vlny, kterou je měřicí systém schopen zachytit nebo kterou má měření za cíl zaznamenat. U kmitočtů na horním okraji akustického pásma je již měření značně problematické, např. pro kmitočet 20 kHz by měřicí pole mělo být od kmitající desky vzdáleno méně než  $\lambda/2 = 0,5c/f = 0,5 \cdot 340/2 \cdot 10^4 = 8,5$  mm.

Důvodem pro toto vzdálenostní omezení je dle [4] exponenciální nárůst evanescentních vln při zvyšování měřicí vzdálenosti, při dosažení hodnoty  $\lambda_c = (z_h - z_s)$  je tento nárůst maximální a činní 55 dB [4]. Pokud má tedy měřicí systém rozlišit akustický tlak na povrchu zdroje s přesností  $\lambda_c$ , musí být odstup signálu od šumu alespoň 55 dB. Pro výpočet rozlišení  $R_x$  rekonstrukce je v [4] odvozen vztah:

$$R_x = 20\pi(z_h - z_s) \frac{\log e}{SNR} = \frac{27,3(z_h - z_s)}{SNR}, \quad (4.17)$$

kde  $SNR$  je odstup signálu od šumu v dB a  $R_x = \lambda_c / 2$ .

Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost měření je rozteč měřících mikrofónů  $\Delta$ , neboli prostorový vzorkovací interval. Zde musí platit dle [14] podmínka  $\Delta < z$ , kde  $z$  je vzdálenost měřicí a zdrojové roviny. V případě nedodržení této podmínky nastává prostorový aliasing [6].

##### Volba mezního kmitočtu k-filtru

Mezní kmitočet  $k_c$  je nutno umístit do blízkosti inflexního bodu ve spektru  $k$ -prostoru a to tak, aby absolutní hodnota zvoleného kmitočtu byla vždy menší než hodnota inflexního bodu. Inflexní bod je místo, kde úroveň užitečného signálu je rovna úrovni šumu [4]. Čím menší odstup signálu od šumu bude na zvolené  $k_c$ , tzn. čím blíže inflexního bodu se bude mezní kmitočet nacházet, tím strmější filtr je nutno implementovat. Pokud by se mezní kmitočet umístil až za inflexní bod, došlo by v důsledku exponenciálního nárůstu úrovně šumu ke zničení rekonstruovaného obrazu.

Normálová rychlost zdroje v doméně vlnových čísel se započítáním vlivu exponenciálního okna bude potom dle [4]:

$$\tilde{W}(k_x, k_y, z_s) = F_x F_y [p(x, y, z_h)] G(k_x, k_y, z_s - z_h) \overline{\Pi} \left( \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{2k_c} \right), \quad (4.18)$$

kde okno  $\overline{\Pi} \left( \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{2k_c} \right)$  představuje kruhový filtr s poloměrem  $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$  [4].

#### 4.1.5 Rekonstrukce

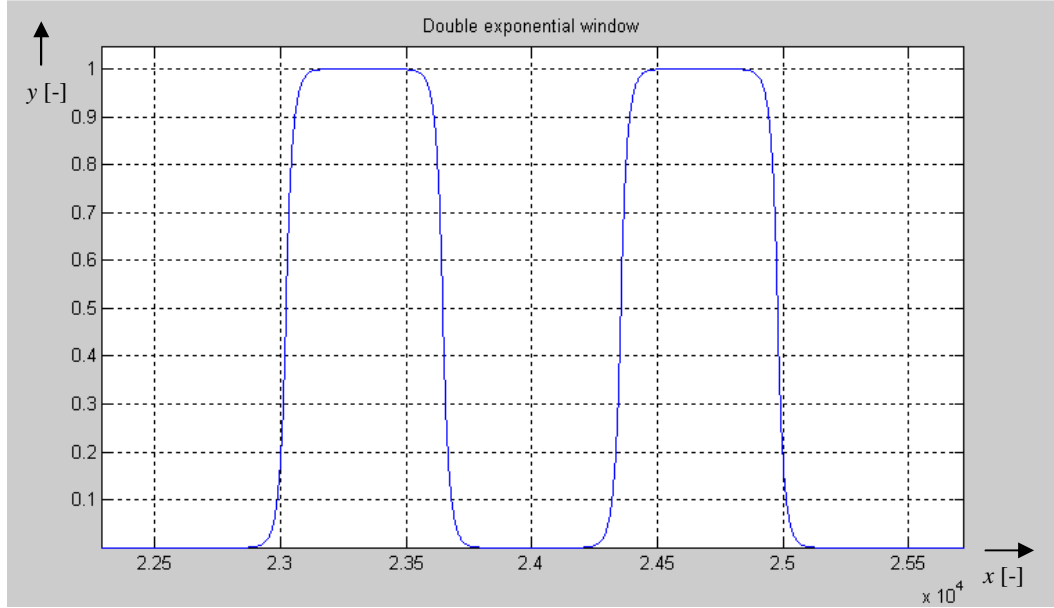
Pro transformaci do oblasti vlnových čísel a tedy výpočet spektra analyzovaného signálu je v akustické holografii v blízkém poli využíváno diskrétní Fourierovy transformace (DFT), pro zpětnou rekonstrukci pak zpětné DFT. Po objasnění principu filtrace v kmitočtové oblasti metodou váhovacích posloupností (tj. exponenciální Harrisovo okno) zde do postupu výpočtu ze str. 21 přibývají další 2 body, nyní tedy platí:

- 1) Změření akustického tlaku  $p(x, y, z_h)$  v rovině blízké k rovině zdroje zvuku.
- 2) Okénkování v časové oblasti pomocí Tukeyova okna a periodizace
- 3) Výpočet spektra  $P(k_x, k_y, z_h)$  změřeného akustického vlnění.
- 4) Vynásobení spektra posloupností exponenciálního Harrisova okna dle rovnice (4.20), což je filtrace v kmitočtové oblasti:

$$P^l(k_x, k_y, z_h) = P(k_x, k_y, z_h) \cdot \overline{\Pi} \left( \frac{\sqrt{k_x^2 + k_y^2}}{2k_c} \right)$$

- 5) Vynásobení spektra inverzním propagátorem  $G(k_x, k_y, z_s - z_h) \rightarrow \dot{W}(k_x, k_y, z_s)$ .
- 6) Výpočet zpětné transformace  $\dot{W}(k_x, k_y, z_s) \rightarrow \dot{w}(x, y, z_s)$

V případě požadavku pásmové filtrace analyzovaného hluku (např. je nutno zjistit, na kterých kmitočtech je akustický tlak nejvyšší) se pásmová propust může zrealizovat opět exponenciálním oknem, ovšem nyní dvojitým, viz obr. 4.7. Toto dvojitě okno je ve spektru umístěno tak, že jeho osa souměrnosti prochází nulou.



Obr. 4.7: Průběh dvojitého exponenciálního Harrisova okna pro  $\alpha = 0,15$ .

Pro dopřednou predikci (tj. predikovaná rovina leží mezi zdrojovou a měřicí rovinou) platí pro inverzní propagátor dle [6]

$$G_p(k_x, k_y, z_s - z_h) = G_p(k_x, k_y, z) = e^{jk_z z}, \quad (4.19)$$

kde index  $p$  značí, že vztah platí pro propagační vlnění. Pro evanescentní vlnění pak platí tentýž vztah, pouze bez imaginární složky v exponentu

$$G(k_x, k_y, z_s - z_h) = G(k_x, k_y, z) = e^{k_z z}. \quad (4.20)$$

Vzdálenost  $z$  značí vzdálenost zdrojové ( $z_s$ ) a měřicí ( $z_h$ ) roviny. Vlnové číslo pro souřadnici  $z$  lze dle vztahu (4.5) vypočítat jako  $k_z = \sqrt{(k^2 - k_x^2 - k_y^2)}$ .

Pro případ, kdy bude uvažováno rovinné vlnění šířící se ve směru osy  $z$  (tj. normála ke zdrojové rovině) bude platit zjednodušený vztah pro inverzní propagátor pro dopřednou predikci, dle rovnice (4.21)

$$G_p(z_s - z_h) = G_p(z) = e^{j\sqrt{k^2}z} = e^{jkz} = e^{j(2\pi f/c)z}. \quad (4.21)$$

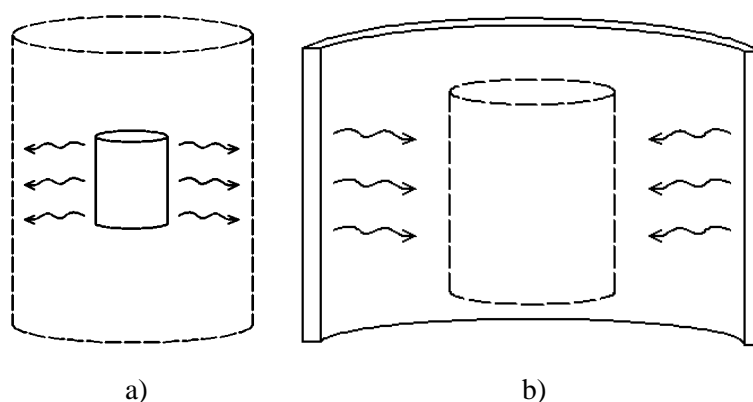
Pro evanescentní vlnu opět platí tentýž vztah bez imaginární jednotky v exponentu [6]

$$G(z_s - z_h) = e^{(2\pi f/c)z} \quad (4.22)$$



## 4.2 Cyklindrická holografie

Tato metoda je využívána v případech, kdy lze předpokládat, že vlnění se bude od zdroje hluku pohybovat po válcových vlnoplochách nebo alespoň bude mít převážně takový charakter. Významného rozmachu doznala cylindrická holografie na počátku 80. let v oblasti zkoumání šíření akustického vlnění pod vodou [4]. Nejčastější uplatnění nachází cylindrická holografie v analýze vibrací ponorek, letadel nebo potrubních systémů továren, elektráren apod. V mnoha ohledech je realizace této metody shodná s planární holografií [4].



Obr. 4.8: Princip cylindrické NAH, a) vnější úloha, b) vnitřní úloha.

Zatímco v planární holografii spadal v úvahu jen jeden způsob měření, tj. rovinná deska- rovinná vlna- rovinné měřící pole, tak v případě cylindrické holografie existují dvě různé situace: měřící pole válcového tvaru snímá vlnění přicházející z vnějšku, veškeré zdroje zvuku se nacházejí na vnější straně tohoto válce- dle [4] tzv. „interior problem“, čili vnitřní úloha. Druhým případem je taktéž válcové měřící pole mikrofónů, avšak veškeré zdroje zvuku se nacházejí uvnitř tohoto válce- tzv. „exterior problem“, čili vnější úloha [4]. Oba případy jsou znázorněny na Obr. 4.3. Na rozdíl od planární holografie v tomto případě nevzniká transformací spektrum úhlové, nýbrž spirálovité vlnové spektrum. Postup při měření metodou cylindrické NAH je následující: nejprve je změřen tlak na měřící ploše pomocí mikrofonního pole, následuje výpočet spirálovitého vlnového spektra [4]. Dále je spektrum vynásobeno inverzním propagátorem tlaku a inverzním propagátorem rychlosti a je vypočítána inverzní Fourierova transformace.

V případě cylindrické holografie je pak dle [4] nutno uvažovat časově závislou vlnovou rovnici (2.1) ve válcových souřadnicích:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad (4.23)$$

kde  $r$  je poloměr tohoto válce,  $z$  je jeho výška a  $\phi$  úhel (azimut).

Eulerova rovnice (2.6) je tedy shodná s planární holografií, pouze dojde ke změně souřadnic na válcové:

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \bar{v}(r, \phi, z) = -\bar{\nabla} p(r, \phi, z). \quad (4.24)$$

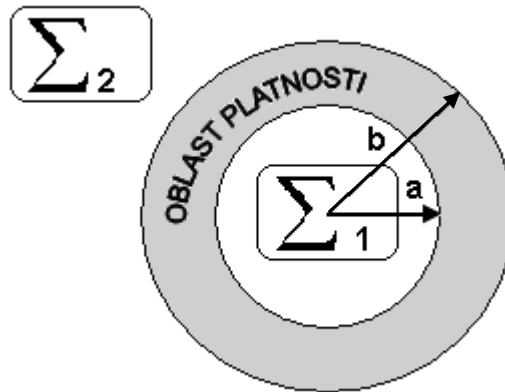
Pro odvození vlnových rovnic je v [4] použita metoda separace proměnných a Besselových funkcí. V časové oblasti je řešením vztah:

$$p(r, \phi, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(r, \phi, z, \omega) e^{-j\omega t} d\omega, \quad (4.25)$$

v kmitočtové oblasti pak:

$$p(r, \phi, z, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\phi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [C_n(k_z, \omega) e^{jk_z z} J_n(k_r r) + D_n(k_z, \omega) e^{jk_z z} Y_n(k_r r)] dk_z, \quad (4.26)$$

kde  $J_n$  je koeficient Besselových funkcí 1. druhu,  $Y_n$  koeficient Besselových funkcí 2. druhu a jsou řešením stojatých vln (více v [4]),  $r$  je poloměr a  $z$  je výška válce. Jsou-li např. dány 2 poloměry  $a$ ,  $b$  přičemž jeden zdroj hluku se nachází v oblasti  $< a$  a druhý zdroj v oblasti  $> b$ , pomyslný disk mezi těmito poloměry se pak nazývá oblast platnosti a pouze v této oblasti lze považovat výpočty za platné [4].

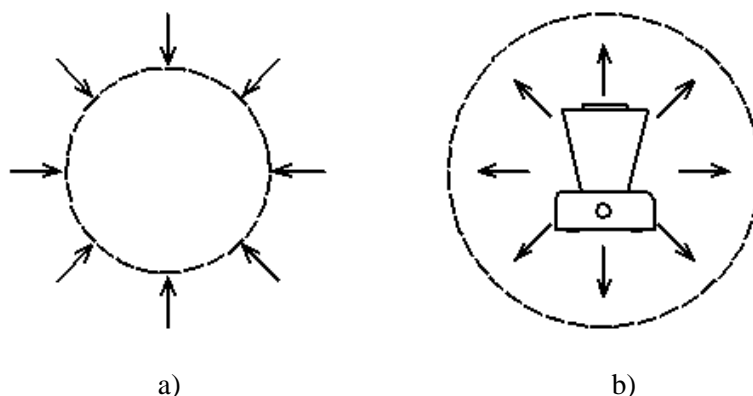


Obr. 4.9: Průřez válcového pole kolmého na osu x.

$\Sigma_1$  a  $\Sigma_2$  představují oblasti, ve kterých jsou umístěny zdroje hluku, průřez je kolmý na osu  $z$ . Podrobný rozbor problematiky cylindrické holografie je k dispozici v [4].

### 4.3 Sférická holografie

V předešlých dvou případech, tedy u planární a cylindrické holografie, bylo zvukové pole tvořeno vlnami, jejichž vlnoplochy směřovaly alespoň v jedné souřadnici k nekonečnu. Ve sférické holografii však kulový tvar měřicí plochy zajišťuje konečnost a kompaktní rozložení vlnoploch [4]. Nejlepších výsledků při analýze zdrojů hluku je dosahováno právě při využití této metody, jelikož vlnění většiny běžně se vyskytujících zdrojů hluku se šíří po kulové vlnoploše (resp. se tomuto tvaru velmi blíží) [4]. Nejčastěji je sférická NAH využívána pro zdroje s nízkými kmitočty vlnění a to až v subakustickém pásmu, neboť při nízkých kmitočtech se vlny šíří nejvíce právě po kulových vlnoplochách. Stejně jako v případě cylindrické NAH existují dva různé základní způsoby měření touto metodou: měřící pole kulového tvaru snímá vlnění přicházející z vnějšku, nachází se uvnitř akustického pole, jedná se tedy o vnitřní úlohu [4]. V případě vnější úlohy jsou zvukové zdroje měřící plochou opět obepnuty z vnějšku. Navíc je zde ještě možnost tzv. rozptylové NAH, která umožňuje počítat s umístěním zdrojů jak uvnitř, tak vně měřící plochu. Mezi vnějšími a vnitřními zdroji je definována opět oblast platnosti. Uvnitř této oblasti jsou umístěny dvě měřící plochy v co nejtěsnější blízkosti vnitřních zdrojů zvuku.

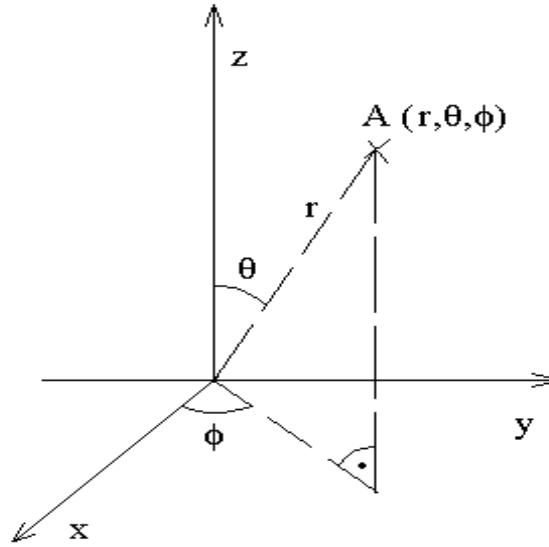


Obr. 4.10: Princip sférické NAH, a) vnitřní úloha, b) vnější úloha.

Systém souřadnic je od kartézského systému odvozen dle soustavy rovnic [4]

$$\begin{aligned}x &= r \sin \theta \cos \phi, \\y &= r \sin \theta \sin \phi, \\z &= r \cos \theta.\end{aligned}\tag{4.27}$$

Význam úhlů  $\theta$  (elevační úhel) a  $\phi$  (azimut) v rámci sférické soustavy souřadnic vystihuje obr. 4.11, bod A zde vyjadřuje bod, jehož sférické souřadnice jsou hledány.



Obr. 4.11: Sférická soustava souřadnic versus kartézská soustava.

Tedy velikost vektoru  $r$  bude  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $\theta = \text{tg}^{-1}[\sqrt{x^2 + y^2} / z]$  a  $\phi = \text{tg}^{-1}\left[\frac{y}{x}\right]$ .

Vlnová rovnice bude pro sférické souřadnice potom dle [4]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (4.28)$$

Operátor gradientu ve sférických souřadnicích je definován [4]:

$$\vec{\nabla} p = \frac{\partial p}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \hat{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \phi} \hat{e}_\phi, \quad (4.29)$$

kde  $(\hat{e}_r + \hat{e}_\theta + \hat{e}_\phi)$  představují jednotkové vektory ve směru každé ze souřadnic. Stejným způsobem, jako v předchozích případech lze psát Eulerovu rovnici v časové oblasti, avšak ve sférických souřadnicích:

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \vec{v}(r, \theta, \phi) = -\vec{\nabla} p(r, \theta, \phi). \quad (4.30)$$

Zde je vektor akustické rychlosti  $\vec{v}$  definován jako  $\vec{v} \equiv w\hat{e}_r + v\hat{e}_\theta + u\hat{e}_\phi$ . Řešení rovnice (4.28) je třeba provést separací proměnných, opět je k dalším výpočtům využito Besselových funkcí 1. a 2. druhu, nyní pro sférické souřadnice. Výsledkem transformace je sférické vlnové spektrum, které je po násobení příslušnými operátory

opět transformováno inverzní transformací do časové oblasti. Celý proces je však komplikovanější než v předešlých dvou případech, pro podrobnější studium lze doporučit literaturu [4], kde je této problematice věnována rozsáhlá kapitola. Je zde popsáno několik možných příkladů řešení, např. pro pulzující kulový zdroj uvnitř měřicí plochy nebo pro píst ve tvaru vrchlíku. Pro řešení těchto úloh je nutná znalost dalších matematických nástrojů, jako Hankelova funkce nebo Neumannova – Greenova funkce.

## 5 JINÉ ZPŮSOBY VÝPOČTŮ UŽÍVANÉ V NAH

Kromě využití algoritmů  $k$ -filtru, které jsou v současné době nejčastější, se lze setkat s dalšími odlišnými přístupy k implementaci NAH. V další části se práce bude věnovat dvěma z nich a to jednak statisticky optimalizované NAH, tj. SONAH a iterativní NAH. Každá z nich má za cíl odstranit některé nedostatky tradiční NAH a docílit tak přesnější predikce.

### 5.1 SONAH

Na rozdíl od klasické NAH tato metoda využívá přímého výpočtu namísto Fourierovy transformace, díky čemuž jsou eliminovány rušivé jevy na okraji hologramu v důsledku spektrálního úniku. Tato metoda je jednou z tzv. „patch“ metod [6], což znamená, že odstraňuje nežádoucí jevy typické pro NAH. SONAH vychází z předpokladu, že je-li k dispozici spektrum určitého vlnění, je možno charakter vlnění vyjádřit sadou elementárních vln. Tato sada je reprezentována převodními koeficienty, pomocí kterých je možno vyjádřit jednak parametry vlnění na pozicích mikrofónů, ale i na měřené rovině. Koeficienty jsou uspořádány do zpětné převodní matice, kde  $N$  odpovídá počtu bodů v holografické rovině a rovině predikované, pro tuto matici pak platí vztah dle [6]:

$$p(x, y, z_x) \approx \sum_{n=1}^N c_n(x, y, z_x) p(x_n, y_n, z_h), \quad (5.1)$$

kde koeficient  $c_n$  představuje příspěvek každé elementární vlny ve zvukovém poli. Aby byla predikce ideálně přesná, bylo by nutno použít sadu nekonečného množství elementárních vln. Tuto sadu lze vyjádřit rovnicí dle [6]:

$$\Phi_K(x, y, z) = e^{j(k_x x + k_y y + k_z z)}. \quad (5.2)$$

Ve skutečnosti je jistě však nutno počítat s konečnou sadou elementárních vln, kterou vystihuje rovnice [6]:

$$\Phi_{K_m}(x, y, z) \approx \sum_{n=1}^N c_n(x, y, z_x) \Phi_{K_m}(x_n, y_n, z) \quad (5.3)$$

Přínosem SONAH je možnost předpovídat hodnoty akustického tlaku i vně predikční roviny  $z_x$  [6], celý výpočet je také méně náročný na výpočetní výkon a je tedy zvlášť vhodný pro měření v reálném čase, např. u pohyblivých objektů. Metoda SONAH je

v současnosti aplikována jak pro planární, tak pro cylindrickou a sférickou NAH, ačkoliv primárně byla vyvinuta pro planární NAH [6].

## 5.2 ITERATIVNÍ NAH S REKURZIVNÍ FILTRACÍ

Jedná se o vylepšený algoritmus tradiční NAH s  $k$ -prostorovým filtrem, který využívá dopřednou predikci prvního odhadu parametrů zvukového pole predikované roviny a porovnání výsledků měření dopředné predikce s původními změřenými hodnotami. Všechny výpočty opět probíhají v doméně vlnových čísel [6]. Chyba predikce je zde definována jako rozdíl mezi spektrem vlnových čísel získaným dopřednou predikcí a spektrem skutečných hodnot akustických tlaků změřených na měřícím poli. Celý proces výpočtu a porovnávání se opakuje tak dlouho, dokud není dosažena požadovaná minimální chyba. V prvním kroku je nastaven  $k$ -prostorový filtr na mezní kmitočet v polovině maximálního měřeného kmitočtu, který odpovídá kroku v prostorových souřadnicích, tedy rozteči mikrofónů [6]. Základní rovnice pro iterativní NAH je dle [6]:

$$P_{zx} = P_{zx-1} + S \cdot (P_{zh} - G_p \cdot P_{zx-1}). \quad (5.4)$$

Zde  $P_{zx}$  je spektrum vlnových čísel akustického pole na predikované rovině,  $P_{zx-1}$  je spektrum vlnových čísel vypočtené v předchozím kroku nebo v případě prvního kroku spektrum odhadnuté na základě jednoduchého algoritmu  $k$ -prostorového filtru.  $S$  představuje činitel zpětné vazby,  $P_{zh}$  je spektrum zvukového pole změřeného na měřícím poli (holografická rovina) a  $G_p$  je Greenova funkce, tj. přímá transformační funkce [6]. Jakožto činitel zpětné vazby lze použít např. Wienův článek [6], který zaručí konvergenci iteračního procesu. Filtrace Wienovým článkem výborně eliminuje negativní účinky šumu a chyby mikrofónů a zamezuje vysokému zesílení evanescentních vln, které by celé měření znehodnotilo. Míru potlačení negativních vlivů reprezentuje regularizační koeficient. Ten je obvykle vyjadřován odstupem signálu od šumu (SNR), tj. rozdíl mezi naměřenými hodnotami a celkovým šumem přenosové cesty.

## 6 PRAKTICKÁ REALIZACE

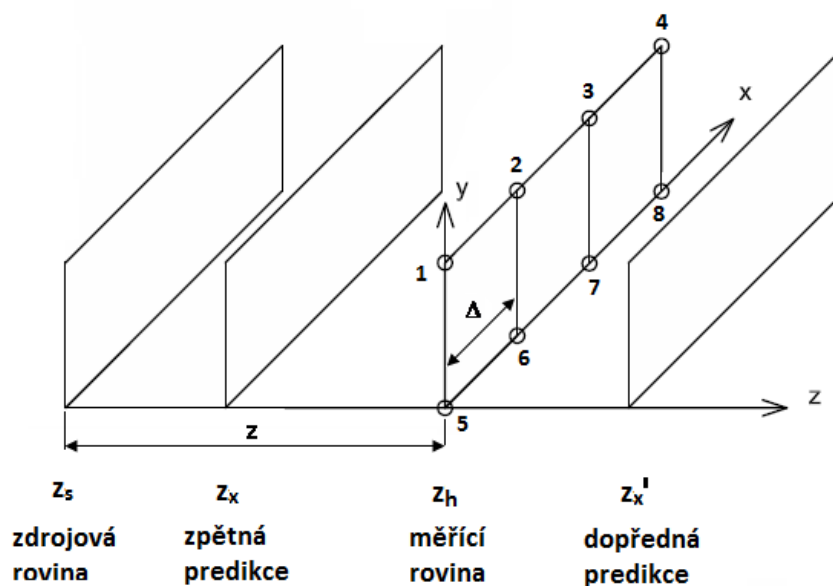
### 6.1 Měřicí podmínky

Pro změření potřebných vstupních dat byla využita bezdrazová komora laboratoře studiové a hudební elektroniky Ústavu telekomunikací. K dispozici bylo 8 ks měřících tlakových kondenzátorových mikrofónů Behringer ECM 8000, rozmístěných do malého statického měřicího pole o dvou řádcích a čtyřech sloupcích. Kmitočtový rozsah tohoto mikrofónu je 15 Hz až 20 kHz a je možno jej fantómově napájet napětím od +15 do +48V.



Obr. 6.1: Mikrofon Behringer ECM 8000.

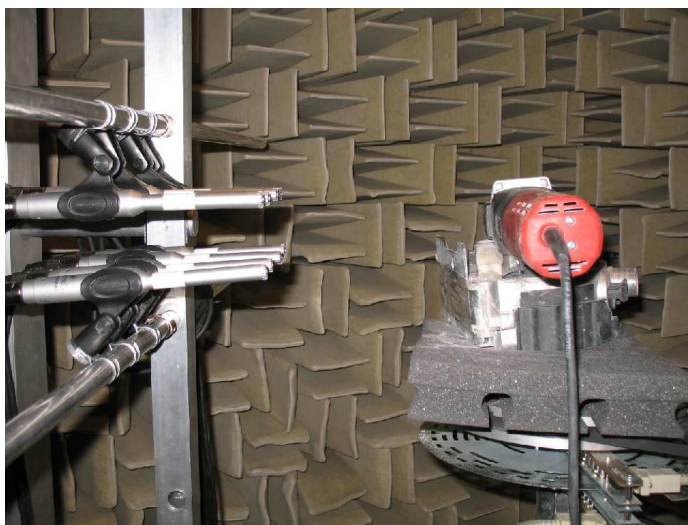
Rozteč mikrofónů  $D$  byla 50 mm v jednom a 55 mm v druhém případě a vzdálenost  $z$  měřicí roviny ( $z_h$ ) a zdrojové roviny ( $z_s$ ) činila pro různá měření s různými zdroji 60, 100, 150, 300, 450 a 600 mm. Situaci znázorňuje obr. 6.2.



Obr. 6.2: Rozmístění rovin při měření.



Mechanické upevnění mikrofonů bylo zajištěno pomocí hliníkové konstrukce, jejíž řešení je patrné z obr. 6.3.



Obr. 6.3: Praktická realizace mikrofonního pole.

Dle [6] a [33] je nutno dodržet tyto podmínky:  $f_{\max} = \frac{c}{2z} = \frac{c}{\lambda_{\min}}$  a  $\Delta > z$ . Jako zdroje

hluku posloužila přímočará pila, větrák opatřený mechanickou překážkou za účelem navýšení hluku a drážkovačka (viz obr. 6.3). Pro záznam byl použit studiový software pro nahrávání a post-mastering Steinberg Cubase. Zaznamenaný zvuk je ve formátu wav, je tedy možno každou zvukovou stopu načíst rovnou do Matlabu jako vektor jednotlivých vzorků. Několikasekundové záznamy byly pouze zkráceny na 30 000 vzorků při vzorkovacím kmitočtu 44100 Hz z důvodu úspory paměti a rychlejšího zpracování, každá stopa má tedy délku cca 0,68 s. Protože měřené signály byly před přivedením na zvukovou kartu počítače ještě zesíleny předzesilovači, u nichž pochopitelně není možno zaručit stejné zesílení, bylo nutno provést kalibraci každého mikrofonu zvlášť pomocí tónového kalibrátoru. Tento krok je vhodný dále také s ohledem na odchylku parametrů mikrofonů, případně i vstupů zvukové karty.

Tónový kalibrátor je elektroakustický měnič vyzařující akustické harmonické vlnění o kmitočtu 1 kHz a akustickém tlaku 1 Pa (přímo na povrchu měniče), což odpovídá 94 dB<sub>SPL</sub>. Takto byly zaznamenány jednotlivé kalibrační zvukové stopy pro každý mikrofon, správný akustický tlak byl vypočítán takto: nejprve je pomocí funkce v Matlabu vypočítána efektivní hodnota signálů nahraných při kalibraci mikrofonů (pro osmiprvkové měřicí pole tedy osm zvukových záznamů zaznamenaných současně, tzn. osm efektivních hodnot). Takto vypočtené efektivní hodnotě se posléze přiřadí hodnota

akustického tlaku 1 Pa, což odpovídá hladině akustické intenzity 94 dB<sub>SPL</sub>. Provede se to tak, že hodnotou 1 Pa vynásobíme převrácenou efektivní hodnotu signálu každého mikrofonu. Takto vznikne množina kalibračních koeficientů, jeden koeficient pro každý mikrofon. Tímto koeficientem je pak po vynásobení jakékoliv jiné efektivní hodnoty signálu získána hodnota akustického tlaku v Pa.

## 6.2 Tvorba programu v prostředí Matlab

Program byl vyvinut ve dvou níže popsanych etapách: nejprve s textovým rozhraním komunikujícím s uživatelem pomocí příkazového okna Matlabu a posléze s grafickým uživatelským rozhraním vytvořeným pomocí *GUI Builderu*.

### 6.2.1 Základ aplikace a textové rozhraní

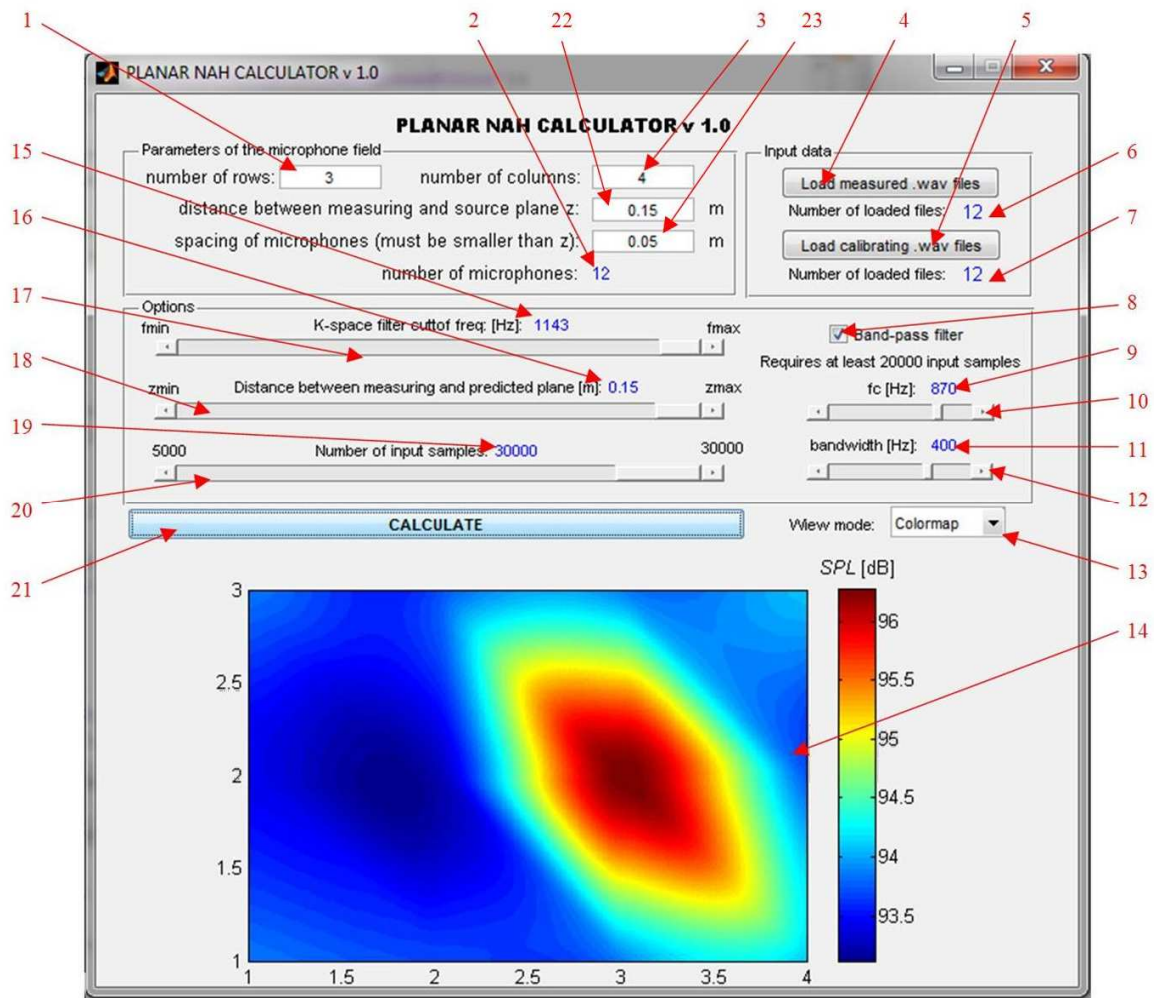
Nejprve bylo vytvořeno jádro aplikace s textovým rozhraním, na přiloženém nosiči je tato aplikace uložena pod názvem NAHbasic. V další části byla řešena též aplikace s uživatelským rozhraním (GUI – graphic user interface) ve verzi Matlabu R2009b, s ohledem na nedokonalou zpětnou kompatibilitu GUI aplikací s verzemi staršími byla základní aplikace ponechána k dispozici.

Uživatel má možnost dle instrukcí načíst naměřené zvukové záznamy ve formátu wav, poté kalibrační záznamy a to v počtu 6 až  $n$  pomocí nástroje multiselect. Číslo  $n$  je omezeno pouze výpočetním výkonem použitého počítače. Dále je uživatel vyzván k zadání počtu řádků a sloupců, aby bylo jasné, jaké rozměry má měřicí plocha. Pakliže počet řádků a sloupců nekoresponduje s počtem načtených stop, je program ukončen. Totéž nastane v případě, že počet stop není dostatečný ( $< 6$ ) nebo počet kalibračních souborů neodpovídá počtu naměřených zvukových stop. Název souboru musí být vždy pouze číslice dle pozice mikrofonu (viz Obr. 6.2) a přípona „.wav“. Pro případ pokusu o načtení příliš dlouhých souborů je hned při načítání omezena délka posloupnosti na 30000 vzorků. Pro rychlost výpočtu by bylo nejlepší omezit tuto délku na minimum (dle nejdelší možné periody), ale s ohledem na možnost měření impulzního hluku, který má kolísavý charakter, bylo vhodnější počítat spíše s delší posloupností. Tyto vzorky jsou dále uspořádány do trojrozměrné matice o rozměrech  $M \times N \times Z$ , kde  $M$  je počet řádků mikrofonního pole,  $N$  je počet sloupců a  $Z$  počet submatic, který odpovídá časové ose. Počet submatic tak odpovídá počtu vzorků signálu, tj. 30000. V časové ose je tento

tenzor váhován Tukeyovým oknem (viz obr. 4.5), které je v Matlabu již implementováno a nadále zpracován pomocí algoritmu NAH: nejprve je provedena DFT získané 3D matice, v kmitočtové oblasti jsou všechny prvky násobeny zpětným propagátorem, viz rovnici (4.22): zájem je tedy soustředěn na evanescentní vlnění. Spektrum je dále filtrováno dolní propustí metodou váhovací posoupnosti, tzn. dle [6] exponenciálním Harrisovým oknem dle rovnice (4.16). Vzhledem k tomu, že se zde předpokládá šíření ve směru osy  $z$  (viz obr. 6.2), výpočet je zjednodušen a okno je jednorozměrné. Po získání rekonstruované matice se pro signál každého mikrofonu vypočte efektivní hodnota, zůstane tak matice o rozměrech  $M \times N$ . Každý její prvek představuje efektivní hodnotu akustického tlaku na predikované rovině v místě odpovídající téže pozici mikrofonu měřicího pole. Aby ve výsledku bylo možno vykreslit spojitý hologram s plynulými přechody, bylo nutno vygenerovat lineární prostor pomocí funkce *linspace* (viz nápovědu Matlabu) a *meshgrid* pro vytvoření 3D pole potřebného k 3D vykreslení vypočtených dat. První a druhý rozměr jsou souřadnice umístění vypočtené hodnoty (odpovídá pozici mikrofonu) a třetí souřadnice vyjadřuje velikost akustického tlaku v tomto místě. Pro „přichycení“ dat do takto připraveného postoru je použita dále funkce *griddata*, která je po zadání parametru „cubic“ schopna chybějící data interpolovat polynomem 3. řádu. Funkce *colormap* zobrazí barevnou souvislou plochu, kde vyšší hodnoty akustického tlaku odpovídají nižším kmitočtům barevného spektra (červená barva) a naopak nejnižší hodnoty odpovídají vyšším kmitočtům barevného spektra (defaultně nejvyš po modrou barvu). Druhý vykreslený obrazec je typu *contour*, ve kterém jsou hodnoty stejné velikosti spojeny křivkou, podobně jako vrstevnice na mapě. Zároveň jsou v tomto obrazci prostřednictvím bodů zvýrazněny pozice mikrofonů v měřicím poli (pro lepší orientaci uživatele).

### 6.2.2 Tvorba grafického uživatelského rozhraní

Toto rozhraní bylo vytvořeno pomocí MATLAB *GUIBuilderu* s cílem co nejvíce uživateli usnadnit výpočet hologramu a ošetřit případná chybná zadání chybovými dialogy, které uživatele navedou na správnou cestu. Vzhled a ovládací prvky programu jsou v legendě na obr. 6.4.



Obr. 6.4: Grafické uživatelské rozhraní s příkladem vypočteného hologramu.

Oproti původní aplikaci zde přibyly funkce volitelné pásmové propusti (viz ovládací prvky 8, 10 a 12 na obr. 6.4) a přepínání mezi zobrazením colormap a contour (prvek 13). Pásmová propust je realizována dvojitém exponenciálním oknem (viz obr. 4.7). Aplikace nyní sama dopočítává maximální přípustný kmitočet akustického tlaku rekonstruovaného pole, tedy mezní kmitočet  $k$ -space filtru, eventuálně horní mezní kmitočet pásmové propusti. Tento kmitočet odpovídá základní podmínce uvedené v části 2.2, a to že pole mikrofonů nesmí být ve vzdálenosti od zdroje hluku větší než  $\lambda/2$  nejkratší vyzařované nebo sledované vlny. Pro urychlení výpočtů je možno zvolit i maximální délku vstupní posloupnosti (ovládací prvek 20) avšak za cenu snížení přesnosti výpočtu. Aby bylo možno realizovat s jistotou kmitočtové filtry s přesností alespoň na 1 Hz, je pro případ volby 20000 a více vzorků posloupnost prodloužena na 48000 vzorků nulami, což odpovídá případu nejvyššího obvyklého vzorkovacího

kmitočtu 48 kHz. Pro počet vzorků větší nebo roven 10000 a současně menší než 20000 je posloupnost prodloužena nulami na 34000 vzorků a pro nižší počet zvolených vzorků dochází k prodloužení na 30000 vzorků. Pro počet vzorků menší než 20000 není již možno použít pásmovou propust, neboť její výpočet by byl příliš nepřesný. V případě nevyužití pásmové propusti se program chová stejně jako verze s textovým rozhraním (viz předchozí podkapitola), navíc jsou zde pouze výše zmiňované funkce prodlužující posloupnost vstupních dat. V programu s grafickým rozhraním je ve výpočetním algoritmu jediný rozdíl: v případě zvolené pásmové propusti se dolní propust vůbec neuplatní a v kmitočtové oblasti se spektrum násobí kromě zpětného propagátoru funkcí dvojitého exponenciálního okna. Šíře oken a jejich vzdálenost je vypočítána z hodnot šířky pásma a středního kmitočtu pásma (viz hodnoty 9 a 11 na obr. 6.4). Program s grafickým rozhraním je součástí přílohy a je spustitelný ve verzi Matlab 2007 a vyšší a to z důvodu problémů se zpětnou kompatibilitou se staršími verzemi. Vývojový diagram aplikace je zobrazen na obr. 6.5.

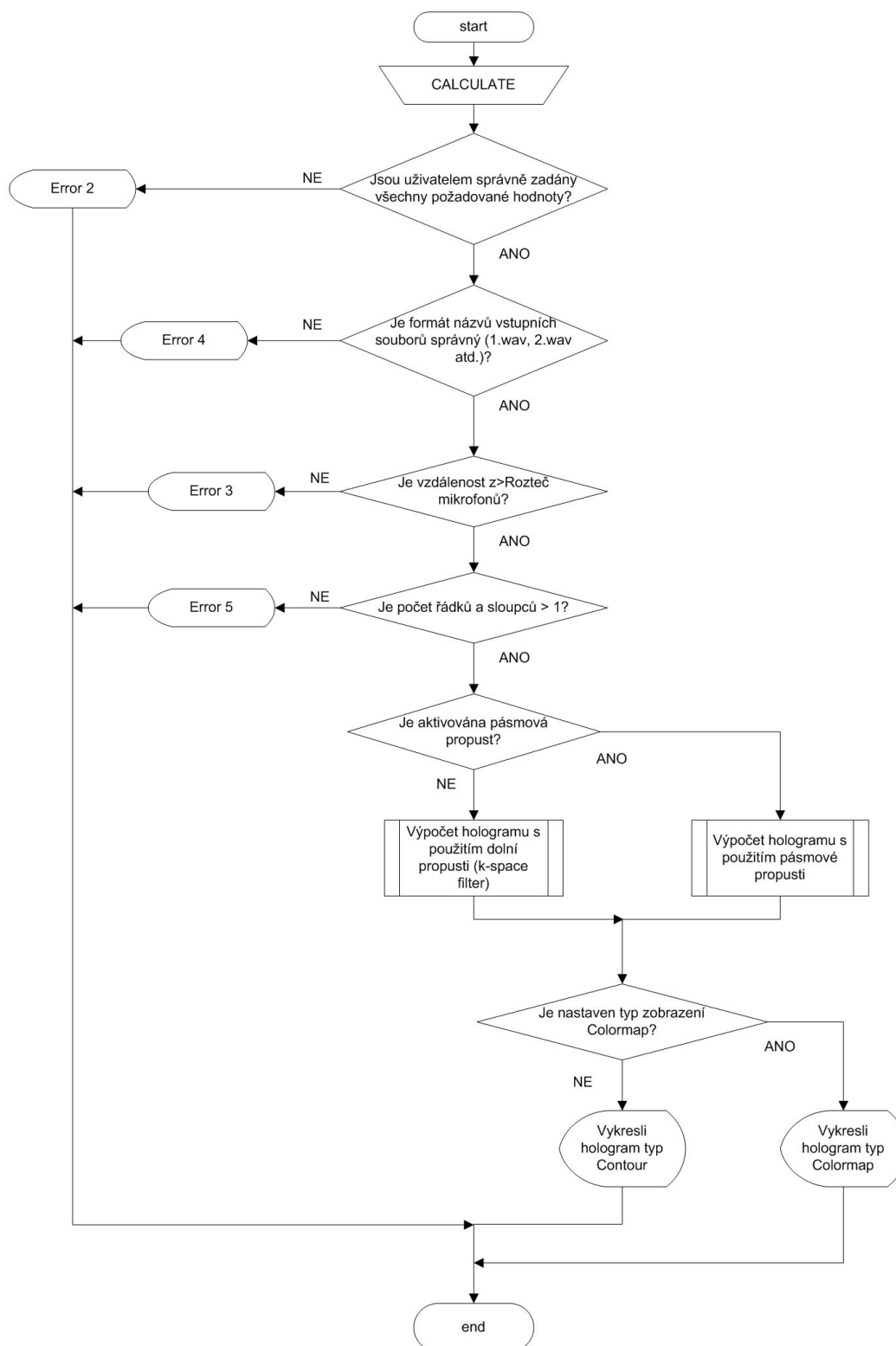
### 6.2.3 Použití programu

Tato podkapitola se odkazuje na ovládací prvky programu (prvek 1, tlačítko 4 apod.), pokud nebude uvedeno jinak, znamená to, že je odkazováno na obr. 6.4.

#### **Základní nastavení**

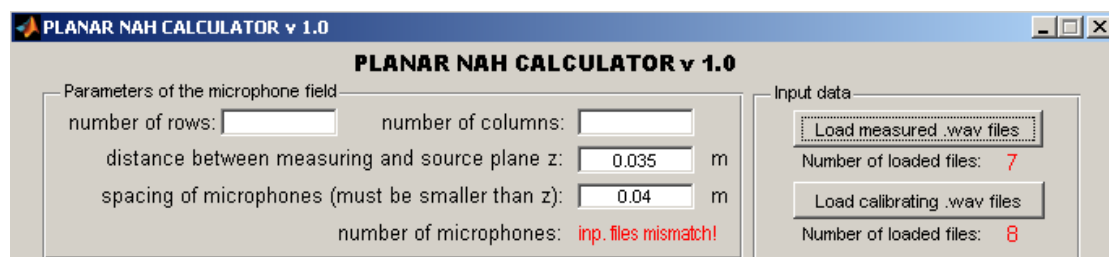
Uživatel po spuštění aplikace (funkce NAHcalculator.m) nejprve intuitivně zadává počet řádků a sloupců měřícího pole (viz prvky 1 a 3 na obr. 6.4). Protože nejsou doposud načteny zvukové soubory, ukazatelé 6 a 7 (počet načtených souborů) indikují číslici 0 a prvek 2 (počet mikrofonů), který se odvozuje od počtu načtených souborů zobrazuje hodnotu „too low“. Poté je zadána vzdálenost zdrojové a měřící roviny (prvek 22) a rozteč mikrofonů (prvek 23). Hodnoty posuvníků byly do nynějška defaultní a zadáním výše uvedených hodnot budou inicializovány: posuvník vzdálenosti predikované roviny (prvek 18) nastaví svoje maximum na hodnotu vzdálenosti  $z$  (prvek 22), minimum je stále nastaveno na nulu, tzn. rekonstrukce pole přímo na měřícím poli. Aktuální hodnota nastavené vzdálenosti je indikována ukazatelem 16. Maximální nastavitelný mezní kmitočet (tedy maximum posuvníku 17) se inicializuje dle vzdálenosti  $z$ , aktuální hodnota mezního kmitočtu je indikována prvkem 15. Po načtení zvukových souborů tlačítka 4 a 5 se pod každým tlačítkem zobrazí počet těchto

souborů. Dokud počet změřených a kalibračních souborů není shodný, prvky 6 a 7 jsou zbarveny červeně, zároveň ukazatel 2 nezobrazuje číslici, ale upozornění



Obr. 6.5: Vývojový diagram aplikace.

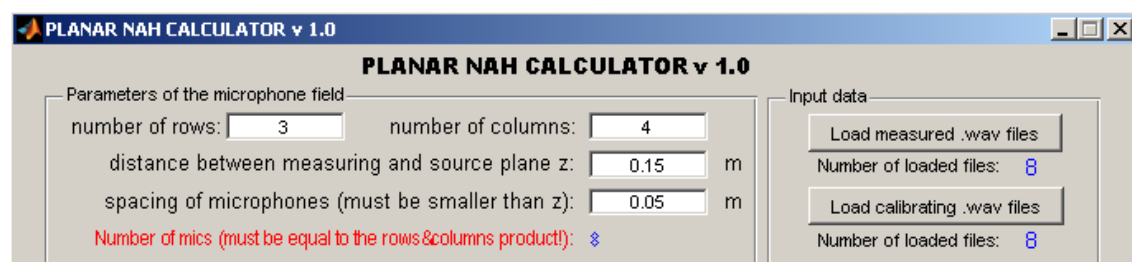
„input files mismatch“ (viz obr. 6.6), tedy počet vstupních souborů nesouhlasí. Pakliže počty načtených souborů souhlasí, ukazatele 6 a 7 se zbarví modře a ukazatel 2



Obr. 6.6: Chybová zpráva nesouhlasného počtu načtených souborů.

zobrazí počet mikrofónů (tedy počet načtených zvukových záznamů).

Pořadí provedení těchto úkonů není kritické, program se inicializuje dle aktuálně dostupných informací. Aby byla dodržena podmínka vzdálenosti měřící a měřené roviny větší než rozteč mikrofónů, zobrazí program chybový dialog *error3* (viz obr. 6.5 a přílohu A) při zadání údaje prvku 22 menšího než je hodnota prvku 23 a to ihned při prvním pokusu o výpočet stisknutím „CALCULATE“ (prvek 21). Pokud se uživatel pokusí spustit program i přes chybové zobrazení (tzn. některé prvky z 2, 6 nebo 7 jsou červeně zbarveny či indikují chybovou zprávu), není program spuštěn a dle typu chyby se opět zobrazí některý z chybových dialogů *error*, jejichž obsah pro jednotlivé případy je patrný z vývojového diagramu na obr. 6.5 a z přílohy A. Pro případ, že soubory jsou načteny správně, ale uživatel zadá nesmyslný počet řádků a sloupců (tedy součin řádků a sloupců se nerovná počtu mikrofónů), program zobrazí chybovou zprávu vedle prvku 2 (viz obr. 6.7). Minimální rozměr měřícího pole, se kterým program počítá je 2x3, v případě načtení menšího počtu souborů než 6 je zobrazena opět zpráva „too low“



Obr. 6.7: Upozornění v případě chybného zadání počtu řádků a sloupců

prvkem 2. Pokud bude program i tak spuštěn, výpočet neproběhne a zobrazí se dialogové okno *error6* (viz přílohu A). Pakliže počet řádků nebo sloupců není větší než 1, program opět zobrazí chybu (*error5*, viz obr. 6.5 a přílohu A). Při spuštění programu

(prvek 21 „CALCULATE“) je také kontrolován správný formát vstupních souborů. Název se musí skládat z číslice dle pozice mikrofonu a přípony „.wav“. Mikrofony je nutno číslovat vzestupně od 1 do  $n$  zleva doprava a shora dolů dle obr. 6.2. Pokud formát názvu není správný, je zobrazen chybový dialog *error4* (viz obr. 6.5 a přílohu A).

Před stisknutím tlačítka „CALCULATE“ je defaultně nastaven typ zobrazení (viz prvek 13 na obr. 6.4) na „Colormap“. Toto nastavení lze změnit na „Contour“ před provedením výpočtu, ale i po něm. Ostatní hodnoty po provedení výpočtu již ovlivnit nelze, dojde-li k přenastavení parametrů, je nutno provést výpočet znova. Po stisknutí tlačítka „CALCULATE“ (tlačítko 21) je vykreslen hologram (viz pozici 14 na obr. 6.4).

### **Rozšířené nastavení: pásmová propust**

Před spuštěním programu je možno zaškrtnutím checkboxu (prvek 8) aktivovat pásmovou propust, jejíž funkce je popsána v části 6.2.2. Pásmová propust je funkční pro 20000 a více vzorků. Její střední kmitočet lze nastavit od 30 Hz do maximálního mezního kmitočtu  $k$ -space filtru sníženého o 40 Hz. Podle toho, do jaké části spektra momentálně uživatel nastavil střední kmitočet pásmové propusti je odvozena maximální šířka pásma tak, aby se jednak exponenciální okna uprostřed spektra nepřekrývala a jednak aby pásmo nezasahovalo do oblasti nad mezním kmitočtem. To by způsobilo markantní nárůst amplitud evanescentních vln (viz část 4.1.4). Nastavení maximální hodnoty středního kmitočtu se provádí automaticky na aktuálně nastavený mezní kmitočet  $k$ -space filtru snížený o 40 Hz. Při každé manipulaci s posuvníkem 17 se inicializuje i posuvník 10: nastaví se jeho maximum a zároveň i jeho aktuální pozice na toto maximum. Takto je zamezeno situaci, kdy by aktuální hodnota posuvníku 10 z předchozího nastavení byla mimo interval nově nastavených mezí. Podobným způsobem se dle posuvníku 10 inicializuje posuvník 12: v závislosti na aktuálním středním kmitočtu (pozice 9) se odvodí maximální možná šířka pásma a na toto maximum se také posuvník 12 nastaví (ze stejných důvodů jako v předešlém případě). Tímto je vysvětleno podivné „přeskakování“ posuvníků při změně hodnoty  $z$  (pozice 22) nebo hodnoty posuvníku 17 či 10. Aktuální nastavené hodnoty posuvníků 10 a 12 jsou zobrazovány na pozicích 9 a 11.

Jak je patrné z vývojového diagramu (obr. 6.5), v případě zvolení pásmové propusti uživatelem se provede v kmitočtové oblasti násobení spektra pouze funkcí



pásmové propusti, dolní propust se neuplatní (bylo by to zbytečné mrhání výpočetním výkonem). Při nevyužití pásmové propusti se naopak uplatní pouze jednoduché exponenciální okno dolní propusti, dvojité okno pro pásmovou propust se vůbec nevypočte. Je třeba vzít také v úvahu, že pro velmi úzká pásma může být přesnost výpočtu dvojitého okna poměrně nízká, pakliže je možno rozlišit kmitočty v řádu jednotek Hz, činí chyba např. pro šířku pásma 40 Hz 2,5%. V případě zvukových záznamů navzorkovaných nižšími kmitočty než 48 kHz je přesnost nastavení šířky pásma samozřejmě jedinečně lepší.

## 6.2.4 Naměřené a vypočtené hodnoty

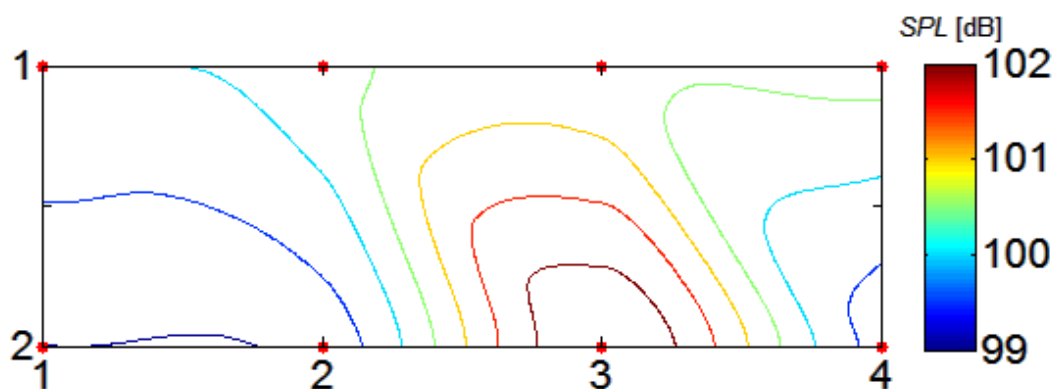
Parametry jednotlivých provedených měření jsou patrné z tabulky Tab. 6.1.

Tab. 6.1: Konfigurace jednotlivých měření

Zdroj hluku	měřicí vzdálenosti [cm]							maximální mezí kmitočet k-space filtru [Hz]	vzorkovací kmitočet [kHz]	Rozteč [mm]
	6	10	15	20	30	40	60			
větrák			x		x		x	1142	44,1	50
přímočará pila			x			x	x	1142	44,1	50
drážkovačka	x	x		x				2957	44,1	55

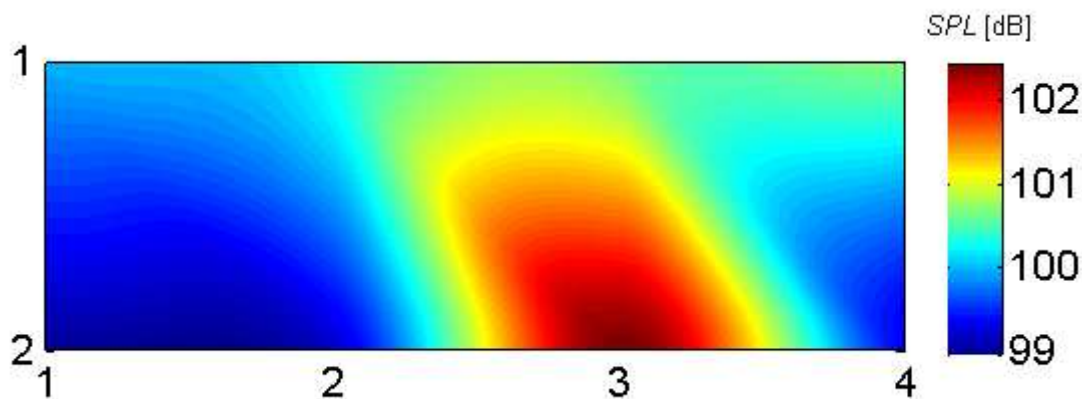
### Přímočará pila

Na obr. 6.8 a 6.9 jsou hologramy zobrazující rozložení akustického tlaku na predikované rovině pro přímočarou pilu, vzdálenost měřicí a predikované plochy  $z_x = 0,15$  m, vzdálenost měřicí a měřené plochy  $z = 0,15$  m.



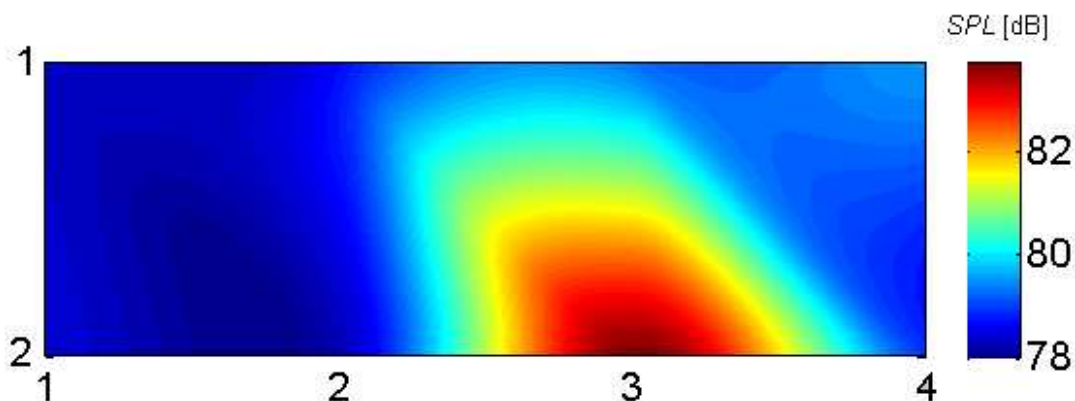
Obr 6.8: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0,15$  m, vrstevnicové zobrazení, přímočará pila.

To znamená, že predikovaná rovina je v tomto případě přímo povrch zdroje zvuku ( $z_x = z_s$ ). Hladina SPL okolo 102 dB se jeví jako pravděpodobně správná.



Obr 6.9: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0,15$  m, zobrazení typu barevná mapa, přímočará pila.

V dalším případě byla zvolena  $z_x = 0$ , rekonstruováno je tedy akustické pole přímo na měřicí ploše, zpětný propagátor je zde tedy nulový. Srovnáním s obr. 6.10 lze posoudit, zda se akustické pole patřičně zeslabuje s rostoucí vzdáleností. Nutno dodat, že pro výpočty se využívá evanescentních vln, které v podmínkách blízkého pole exponenciálně klesají s rostoucí vzdáleností.

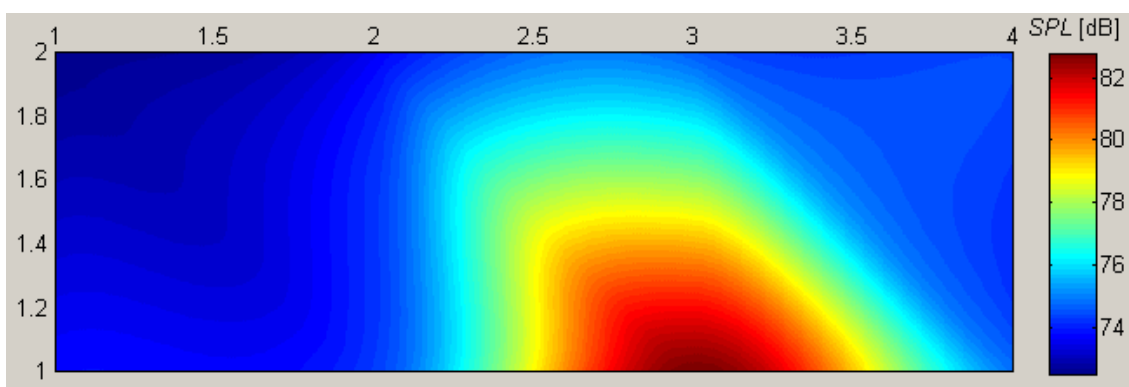


Obr 6.10: Rozložení akustického tlaku na měřicí rovině,  $z = 0,15$  m,  $z_x = 0$ , zobrazení typu barevná mapa, přímočará pila.

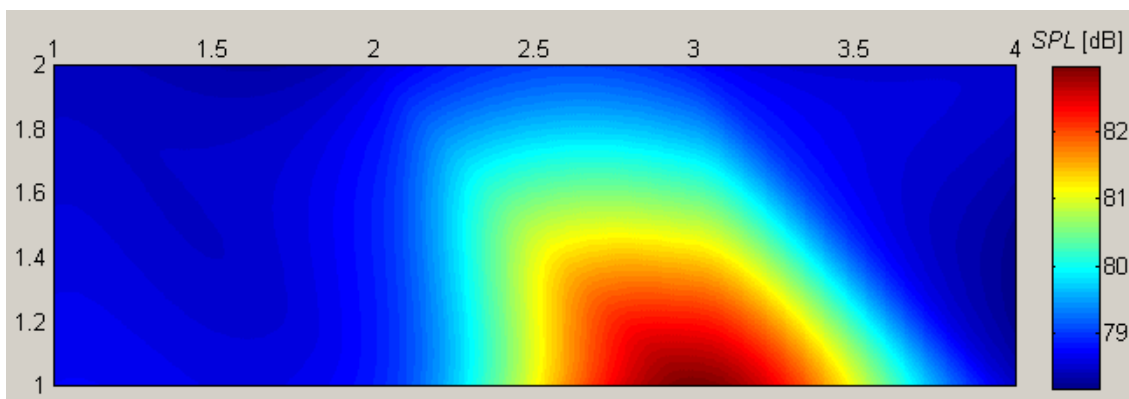
Na obr. 6.10 je zřetelné zeslabení oproti prvnímu měření. Ve všech případech byl horní mezní kmitočet pro výpočet omezen na  $f_{\max} = \frac{c}{2d} = \frac{343}{2 \cdot 0,15} \doteq 1143$  Hz.

Nyní bude provedena kontrola správnosti predikovaného pole. Nejprve bude rekonstruováno zvukové pole pro pásmo do 400 Hz na zdrojové rovině při měření ve

vzdálenosti 15 cm a posléze pro vzdálenost 40 cm. Akustické tlaky v obou těchto výsledcích by se neměly příliš lišit. V případě nastavení koeficientu  $\alpha$   $k$ -space filtru na hodnotu 0,15 činil rozdíl rekonstruovaných polí přes 1,2 dB. Po snížení tohoto koeficientu na hodnotu 0,08 byla již chyba přibližně v maximální hodnotě akustického tlaku nižší než 0,8 dB (viz obr. 6.11 a obr. 6.12). Důvodem značného rozdílu (asi 5 dB) v minimech hologramu mohou být sejmuté případné odražené vlny, které při nižší vzdálenosti nehrály roli. Podobný nárůst oproti rekonstrukci zdrojové roviny ve vzdálenosti 40 cm následoval při měření ve vzdálenosti 60 cm.



Obr. 6.11: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, přímočará pila,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=400$  Hz.

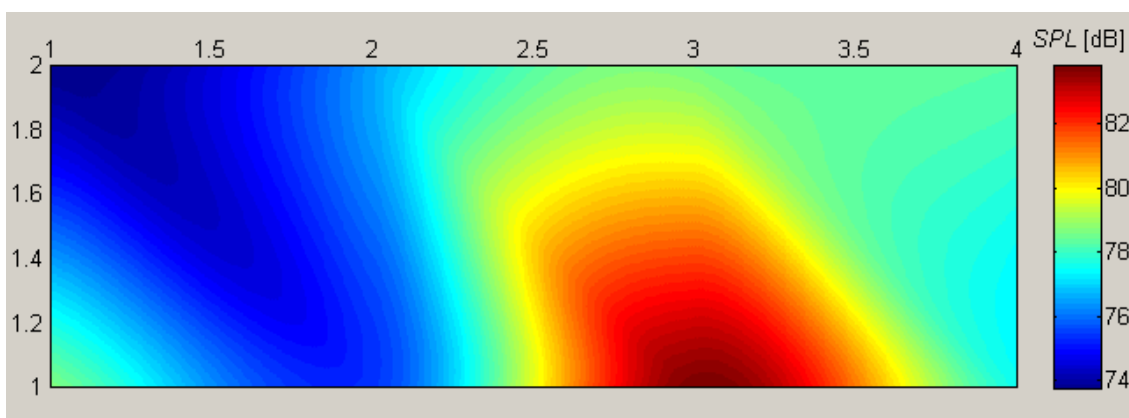


Obr. 6.12: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, přímočará pila,  $z=0,4$  m,  $z_x=0,4$  m,  $f_{mez}=400$  Hz.

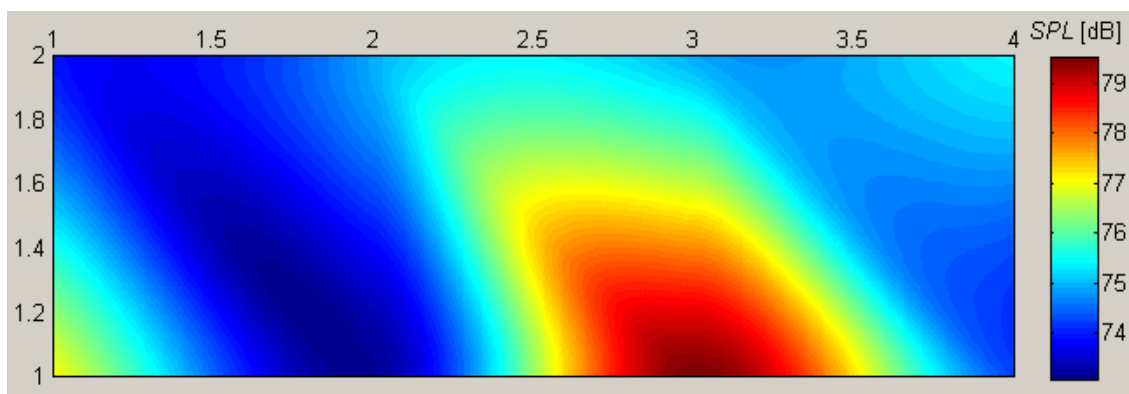
### Větrák

Bylo provedeno totéž kontrolní měření v případě větráku, zde byla však chyba větší a to okolo 3 dB v maximální hodnotě akustického tlaku na hologramu. Sledované pásmo bylo do 500 Hz. Výsledky jsou znázorněny na obr. 6.13. a 6.14. Vzniklé chyby

mohou být způsobeny také odlišností skutečných vlnoploch zkoumaného vlnění od rovinných.



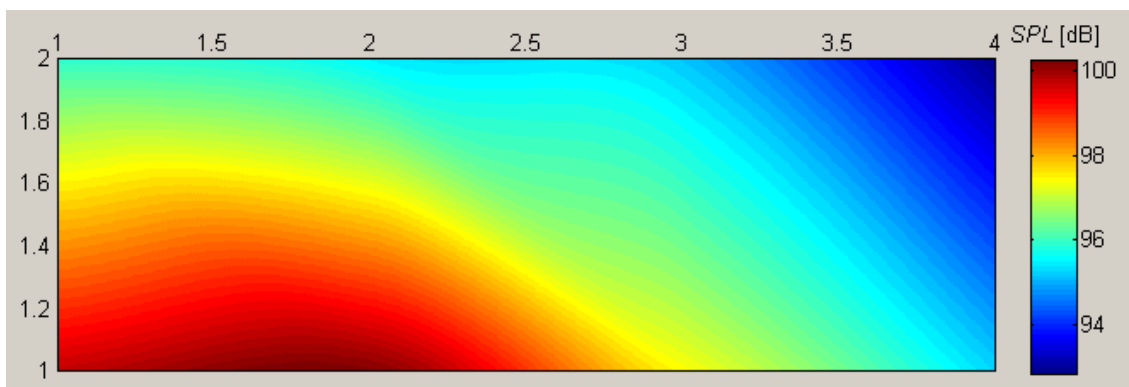
Obr. 6.13: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, větrák,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=500$  Hz.



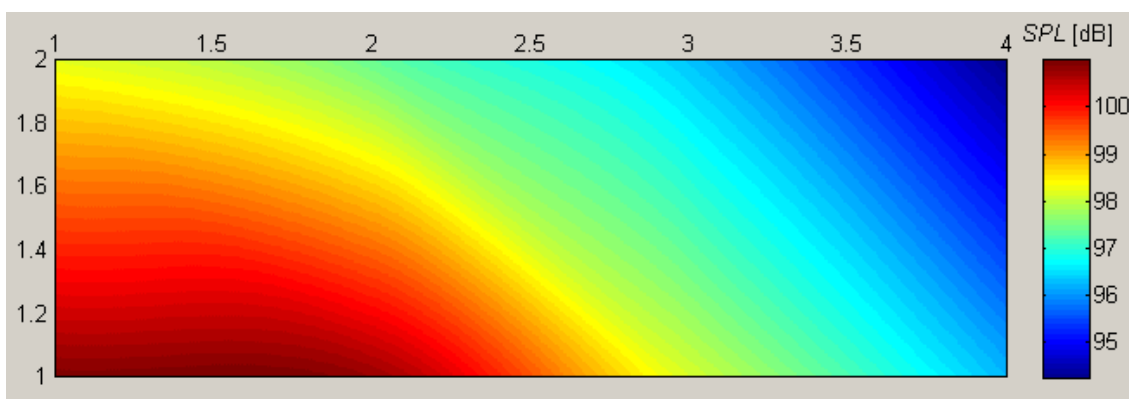
Obr. 6.14: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, větrák,  $z=0,15$  m,  $z_x=0,15$  m,  $f_{mez}=500$  Hz.

### Drážkovačka

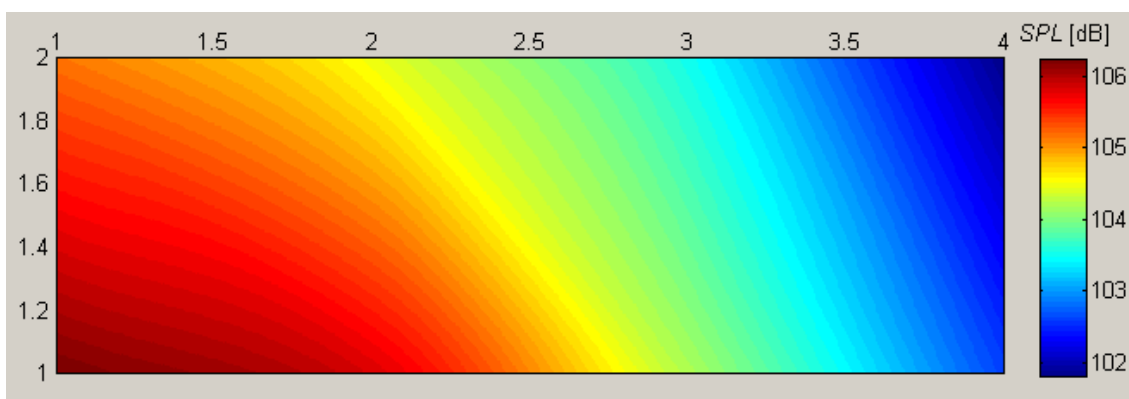
Pro drážkovačku byla provedena obdobná 3 srovnávací měření. Byla rekonstruována zdrojová rovina při třech různých vzdálenostech zdroje od měřícího pole při zkoumaném pásmu do 850 Hz. Opět se projevila značná chyba způsobená pravděpodobně odlišným tvarem vlnoploch. Tyto tři situace jsou znázorněny na obr. 6.15, 6.16 a 6.17.



Obr. 6.15: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

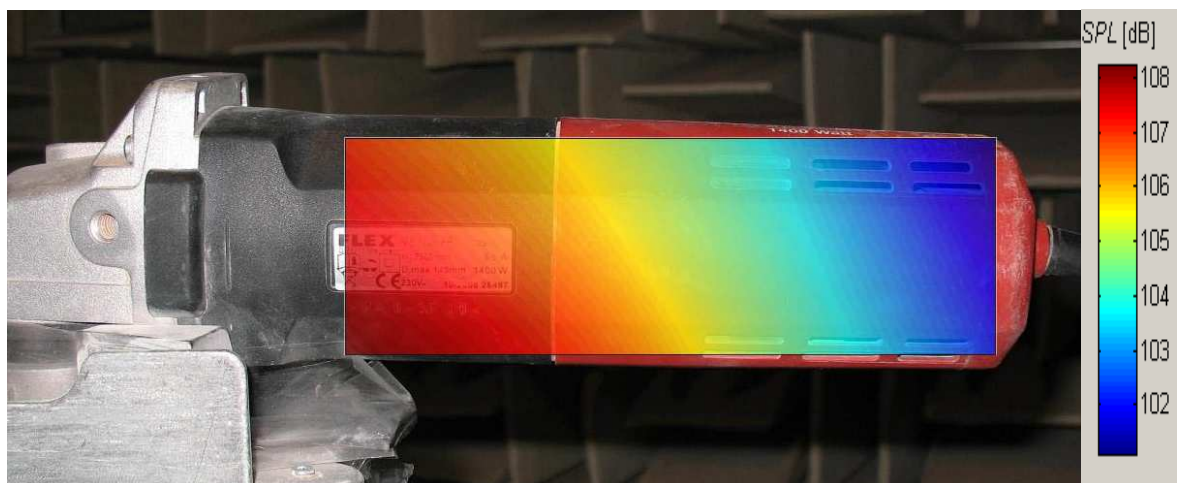


Obr. 6.16: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,1$  m,  $z_x=0,1$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

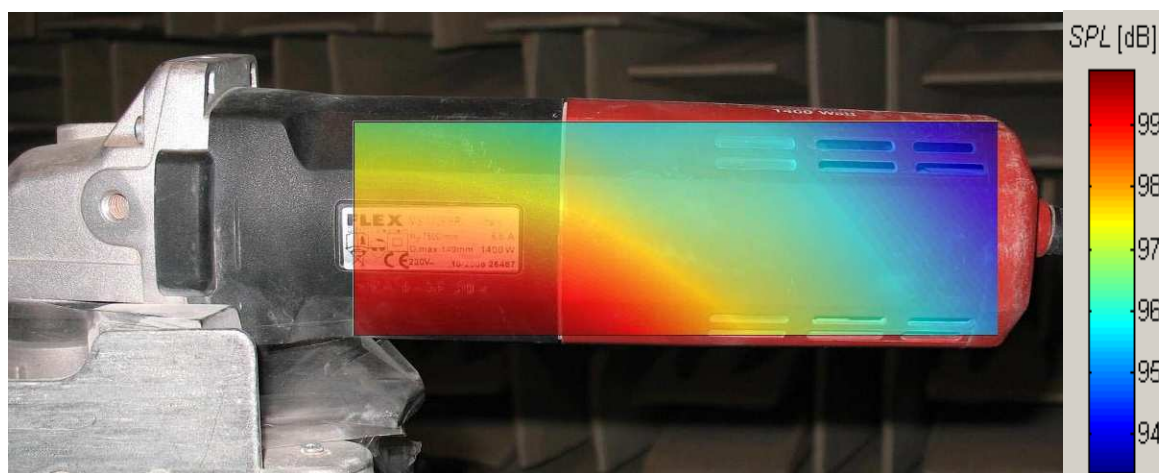


Obr. 6.17: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,2$  m,  $z_x=0,2$  m,  $f_{mez}=850$  Hz.

Dále byla provedena měření testující pásmovou propust, na obr. 6.18 je hologram prvního z nich zobrazen nad analyzovanou plochou drážkovačky.



Obr. 6.18: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_c=2000$  Hz,  $B=1000$  Hz.



Obr. 6.19: Rozložení akustického tlaku na predikované rovině, drážkovačka,  $z=0,06$  m,  $z_x=0,06$  m,  $f_c=818$  Hz,  $B=1000$  Hz.

Je-li srovnán hologram z obr. 6.18 a obr. 6.15, lze usoudit, že většina energie akustického pole hluku produkovaného drážkovačkou je soustředěna na vyšších kmitočtech. Totéž dokládá srovnání obr. 6.18 a 6.19. Z obr. 6.18 a 6.19 je také zřejmé, že většina hluku je produkována v místě převodovky drážkovačky.

## 7 ZÁVĚR

Studiem metody měření akustického tlaku a akustické intenzity pro identifikaci zdrojů hluku a problematiku akustické holografie v blízkém poli z doporučené literatury byly v této práci popsány potřebné teoretické základy pro analýzu zdroje hluku v laboratorních podmínkách. Vzhledem ke skutečnosti, že k dispozici bylo plošné mikrofonní pole o 8 tlakových mikrofonech, byla zvolena metoda planární a analyzovaný zdroj hluku byl považován za zdroj převážně rovinných vln. Dalším důvodem pro tuto volbu je také vysoká konstrukční náročnost válcových či sférických mikrofonních polí a určitá prostorová omezenost laboratoře. Metody cylindrické a sférické NAH byly proto popsány pouze v informativním rozsahu a zvláštní důraz je kladen na planární NAH. V rámci práce byly také popsány některé typy mikrofonů vhodných pro měření technikou NAH.

Vlastní příprava skriptu v prostředí Matlab byla rozdělena do dvou fází, nejprve tvorba jádra aplikace s textovým rozhraním a posléze zpracování grafického uživatelského rozhraní. Výsledný program je možno využít pro výpočet hologramů pomocí NAH s měřicím mikrofonním polem od 6 do  $n$  mikrofonů, kde  $n$  závisí na použitém počítači. Testováno bylo 256 vstupních souborů na dvoujádrovém procesoru s taktem 3 GHz, 4 GB RAM a 64 bitovém operačním systému a výpočet byl hotov za 13 sekund i s použitím pásmové propusti. Druhý test se 180 vstupními soubory byl proveden na jednojádrovém procesoru s taktem 1,6 GHz, 1 GB RAM a 32 bitovém operačním systému, doba výpočtu byla 220 sekund. Při pokusu počítat s více soubory Matlab ohlásí nedostatek paměti. Na vypočtených hologramech je patrná značná chyba, při srovnání rekonstrukce měřené roviny pro různé vzdálenosti mikrofonního pole se odchylka pohybovala od 0,8 do 5,5 dB. Hlavním původcem je pravděpodobně skutečnost, že tvary vlnoploch jsou daleko komplikovanější než předpokládaná rovinná vlnoplocha. Program je tedy vhodný pro analýzu přístrojů s rovinným charakterem povrchu a mikrofonní pole je nutno přiblížit tak blízko k analyzovanému zdroji hluku, jak je to jen možné. Program je vhodný tam, kde je nutno určit, ve které části spektra je nejvíce soustředěna energie zvukového pole díky implementované pásmové propusti.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BROWN, L. A.; Knight J.A.G.; Croft A.; Hargreaves M. Acoustic imaging using nearfield holography. *Acoustic Sensing and Imaging, 29-30 March 1993, Conference Publication No. 369*. IEEE, 1993, s 239-244. ISBN 0-85296-575-3.
- [2] SMETANA, C. *Hluk a vibrace*. Praha: Sdělovací technika, 2000. ISBN 80-90 1936-2-5.
- [3] KÁŇA, L. *Elektroakustika*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2002. 93 s.
- [4] WILLIAMS, E., G., *Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography*. London: Academic Press, 2003. ISBN: 978-0127539607
- [5] MAHFUZ, A.; KEITH, Y.W.; METHERELL A.F. Holography and Its Application to Acoustic Imaging. *Proceedings of the IEEE*, 1979, roč. 67, č. 4, s. 466-482. ISSN 0018-9219
- [6] HAVRÁNEK, Z. *Using acoustic holography for vibration analysis*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2009.
- [7] WANG, X.; YANG, S.; ZHAO J.; GUO J. Application research on NAH for identification of plant sound source. *Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, Nanjing: SPAWDA, 2008, s 187. ISBN 978-1-4244-2891-5.
- [8] KYNCL, Z. Vyjádření prostorového zvukového pole pomocí pole povrchového. *Akustické listy*, 2004, roč. 10, č. 3, s. 9-17. ISSN 1212-4702
- [9] Brüel & Kjær, [online] c2010. Dostupný z WWW: <<http://www.bksv.com>>.
- [10] GRUNTORÁD, R., *Microphone arrays in acoustic holography*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication, 2004.
- [11] ULLMANN, Vojtěch. *Astronuklfyzika* [online]. 2002 [cit. 2011-05-11]. FILTRY a FILTRACE v nukleární medicíně. Dostupné z WWW: <<http://www.astronuklfyzika.cz/strana2.htm>>.
- [12] SCHIMMEL, J.; SYSEL, P. *MCSI – Číslicové zpracování signálů*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. Cvičení: Základy zpracování deterministických signálů, s. 1-19.
- [13] SMÉKAL, Z.; SYSEL, P. *Číslicové filtry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2004. 128 s.



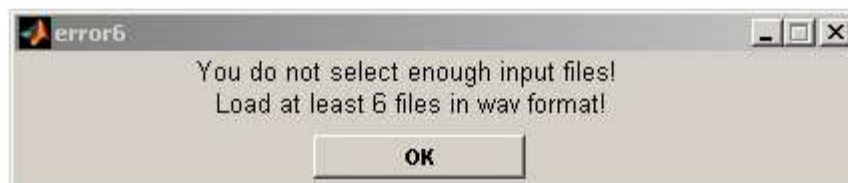
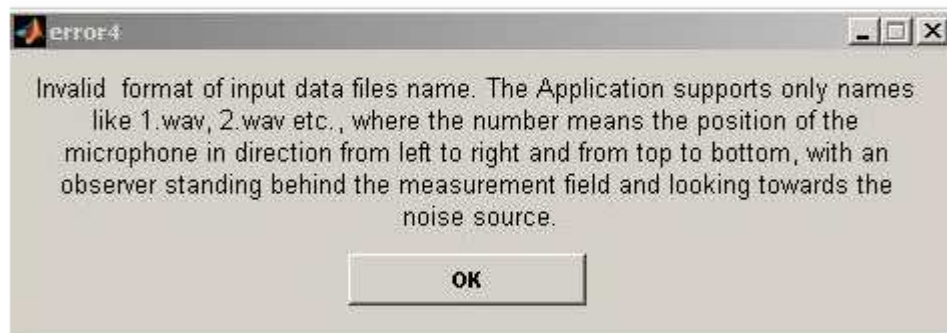
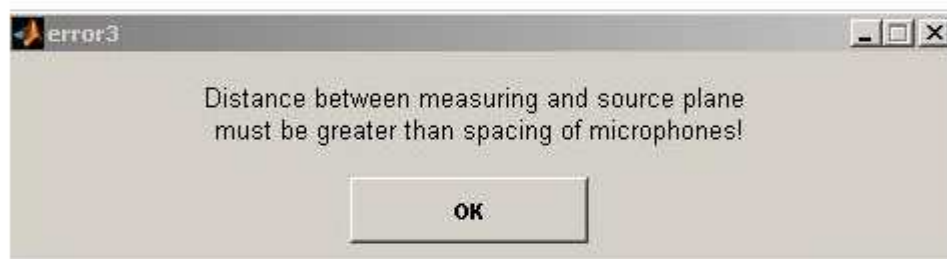
[14] KIM, Y.-H. Can we hear the shape of a noise source?. In *Proceedings of International Congress on Acoustics ICA 2004*, p. 1-58, Kyoto, Japan, April 2004. The 18th International Congress on Acoustics.

[15] Zaplatílek, K., Doňar, K., Matlab, tvorba uživatelských aplikací. BEN - Technická literatura, Praha 2004. ISBN: 80-7300-133-0

# SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	akustické zrychlení
$B_n$	koeficient besselových funkcí 2. druhu
B&K	Brüel & Kjær
$c \text{ (m/s)}$	atmosférická rychlost zvuku
DFT	diskrétní Fourierova transformace
$e \text{ (J/m}^3\text{)}$	hustota energie
FFT	rychlá Fourierova transformace
$G \text{ (-)}$	propagátor rychlosti
GUI	grafické uživatelské rozhraní
$g_v^{-1} \text{ (-)}$	inverzní propagátor rychlosti
$I \text{ (W/m}^2\text{)}$	akustická intenzita
$J_n$	koeficient besselových funkcí 1. druhu
$k \text{ (m}^{-1}\text{)}$	vlnové číslo
$M$	počet řádků mikrofonního pole
$N$	počet sloupců mikrofonního pole
NAH	akustická holografie v blízkém poli
$p \text{ (Pa)}$	akustický tlak
$R_x \text{ (m)}$	rozlišení rekonstrukce
$r \text{ (m)}$	poloměr válce/ koule
SNR (dB)	odstup signálu od šumu (signal to noise ratio)
SONAH	Statisticky optimalizovaná akustická holografie v blízkém poli
$v \text{ (m/s)}$	akustická rychlost
$w \text{ (m}^3\text{/s)}$	akustická objemová rychlost
$z \text{ (m)}$	vzdálenost měřené a měřící roviny
$z_h \text{ (m)}$	zetová souřadnice měřící roviny
$z_s \text{ (m)}$	vzdálenost zdroje hluku od měřícího pole
$z_x \text{ (m)}$	vzdálenost predikované roviny od měřící roviny
$\alpha$	koeficient strmosti k-space filtru
$\Delta \text{ (m)}$	rozteč mikrofونů
$\kappa \text{ (-)}$	koeficient stlačitelnosti plynu
$\lambda \text{ (m)}$	vlnová délka
$\lambda_c \text{ (m)}$	mezní kmitočet $k$ -space filtru
$\Pi$	obdélníkové okno
$\rho_0 \text{ (kg/m}^3\text{)}$	hustota prostředí
$\omega \text{ (rad/s)}$	úhlový kmitočet
$\nabla \text{ (-)}$	operátor nabla
$\bar{\Pi}$	Harrisovo exponenciální okno

## Příloha A: Chybové dialogy uživatelské aplikace NAHcalculator



## **Příloha B: obsah CD**

1. Elektronická verze diplomové práce
2. Aplikace *NAHbasic.m*
3. Aplikace *NAHcalculator.m*
4. Pomocná funkce *rms.m*
5. Pomocná funkce *sortmic.m*
6. Pomocná funkce *fft3D.m*
7. Chybové dialogy
8. Dialog „Computing“